

Marina de Oliveira Alencar

DESENVOLVIMENTO DE FSS COM RESPOSTA PASSA-FAIXA BASEADA NA GEOMETRIA MATRIOSKA

**João Pessoa - PB
Abril de 2020**

Marina de Oliveira Alencar

**DESENVOLVIMENTO DE FSS COM RESPOSTA PASSA-FAIXA
BASEADA NA GEOMETRIA MATRIOSKA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto

João Pessoa – PB, Abril de 2020
Marina de Oliveira Alencar – marina.alencar.93@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

A368d Alencar, Marina de Oliveira.

Desenvolvimento de FSS com resposta passa-faixa baseada na geometria matrioska / Marina de Oliveira Alencar. – 2020. 69 f. : il.

Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2020.

Orientador : Prof^o. D.r Alfrêdo Gomes Neto.

1. Engenharia elétrica - telecomunicações. 2. Superfície Seletiva em Frequência (FSS). 3. Geometria matrioska. 4. Resposta passa-faixa. 5. Estabilidade da Polarização. I. Título.

CDU 621.3.018.4(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária
CRB 15/132

Marina de Oliveira Alencar

**DESENVOLVIMENTO DE FSS COM RESPOSTA PASSA-FAIXA
BASEADA NA GEOMETRIA MATHIOSKA**

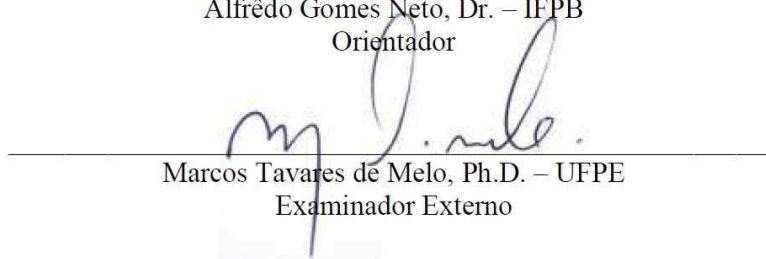
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal da Paraíba como requisito
necessário à obtenção do grau de Mestre em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de mestrado defendida e aprovada em _27/_04/_2020_


BANCA EXAMINADORA



Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Orientador



Marcos Tavares de Melo, Ph.D. – UFPE
Examinador Externo



Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno



Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno

João Pessoa – PB
Abril de 2020

Agradecimentos

A Deus, por me capacitar, me dar um propósito que me fez chegar até aqui, me cercar de pessoas que foram chave para me ajudar nessa caminhada.

Aos meus pais, Paulo e Solange, por todo apoio e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus irmãos, em especial, Sara, que sempre me apoiou de perto.

Aos meus mentores, Márcio e Dayse Melo, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem.

Ao meu orientador, Alfrêdo Gomes, que para mim é um dos maiores exemplos de pessoa que ama aquilo que faz e exerce com competência não só o seu papel de orientador, mas encorajador e formador de novos profissionais. Obrigada por todo apoio, ajuda, por sempre esperar o melhor de mim, isso me esticou como pessoa e ser humano.

Aos meus amigos que conquistei no IFPB, Marília, Walisson, Amanda, Ianes, Tales, Thamyres e Andrécia por sempre serem apoiadores, e pessoas que vou levar para o resto da minha vida.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, que tive a oportunidade de estudar e aprender.

A todos os colegas e funcionários que conheci e convivi no IFPB. Obrigada por me acolherem tão bem, vocês são de fato uma família.

“Eu acredito que a grande tragédia da vida não é a morte. Mas a grande tragédia da vida é uma vida sem propósito.”

Myles Munroe

RESUMO

Com o crescimento das redes de comunicação sem fio e as novas demandas dos sistemas de telecomunicações, as superfícies seletivas em frequência, FSS, vêm atraindo a atenção de vários grupos de pesquisa para diversas aplicações, tais como veículos aéreos não tripulados, radar veicular, sistemas de radionavegação, TV digital, serviços baseados em Internet, enlaces terrestres, entre outras. Quando utilizadas nessas aplicações, as FSS tanto podem apresentar resposta em frequência do tipo rejeita-faixa, como passa-faixa. Nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento de FSS baseada na geometria matrioska com resposta em frequência passa-faixa, preservando as características como a miniaturização, operação multibanda e a estabilidade da polarização e do ângulo de incidência. A obtenção da geometria matrioska é descrita passo a passo, sendo também propostas equações que fornecem os valores iniciais das duas primeiras frequências de ressonância. Foram projetadas, fabricadas e caracterizadas numericamente e experimentalmente duas FSS, uma com frequências de ressonância em 1,52 GHz e 3,47 GHz, com frequência central de rejeição em 2,42 GHz e a outra com frequências de ressonâncias em 2,42 GHz e 5,11 GHz, com frequência central de rejeição em 3,61 GHz. Os resultados numéricos e experimentais consideraram as polarizações x e y , com ângulos de incidência variando até 45° . As equações iniciais de projeto propostas apresentaram resultados adequados e observou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, confirmando a resposta em frequência esperada, com estabilidade da polarização e do ângulo de incidência.

Palavras chave: Superfície seletiva em frequência, geometria matrioska, estabilidade da polarização, resposta passa-faixa, operação multibanda.

ABSTRACT

With the growth of wireless communication networks and the new demands on telecommunication systems, frequency selective surfaces, FSS, have attracted the attention of several research groups to different applications, such as unmanned aerial vehicles, vehicular radar, radio navigation systems, digital TV, Internet-based services, terrestrial links, among others. When used in these applications, the FSS can present a band-reject frequency response, as well a band-pass. In this dissertation it is presented the development of FSS based on the matryoshka geometry with band-pass frequency response, preserving characteristics such as miniaturization, multiband operation and independence of polarization and incidence angle. Obtaining matryoshka geometry is described step by step, equations are also proposed that provide the initial values of the first two resonance frequencies. Two FSS were designed, manufactured and characterized numerically and experimentally, one with resonance frequencies at 1.52 GHz and 3.47 GHz, with rejection band at 2.42 GHz and the other with resonance frequencies at 2.42 GHz and 5.11 GHz, with rejection band at 3.61 GHz. The numerical and experimental results considered the x and y polarizations, with incidence angles varying up to 45° . The initial design equations proposed showed adequate results and a good agreement was observed between the numerical and experimental results, confirming the expected frequency response, regardless of the polarization and the angle of incidence.

Keywords: Frequency selective surface, matryoshka geometry, polarization stability, band-pass answer, multiband operation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços [6]	15
Figura 2 – Exemplos de bonecas matrioska [24]	18
Figura 3 – Geometria matrioska [17]	18
Figura 4 – Nova geometria matrioska [20]	19
Figura 5 – Modelo básico de uma FSS [15]	20
Figura 6 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.....	21
Figura 7 – FSS do tipo <i>patch</i> [3]	22
Figura 8 – FSS do tipo abertura [43]	22
Figura 9 – Elementos do Grupo 1 [11]	23
Figura 10 – Elementos do Grupo 2 [11]	23
Figura 11 – Elementos do Grupo 3 [11]	24
Figura 12 – Elementos do Grupo 4 [11]	24
Figura 13 – Geometrias investigadas no GTEMA – IFPB	24
Figura 14 – Representação de uma FSS de anteparo fino [19]	25
Figura 15 – FSS de anteparo espesso [47]	26
Figura 16 – Exemplos de FSS passiva	26
Figura 17 – Exemplos de FSS eletronicamente reconfiguráveis.....	27
Figura 18 – Exemplo de FSS reconfigurável eletronicamente e mecanicamente	28
Figura 19 – Exemplos de FSS reconfiguráveis mecanicamente.....	28
Figura 20 – FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas [43]	29
Figura 21 – Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS [64]	29
Figura 22 – Exemplos de usos de radomes [67]	30
Figura 23 – Aplicação de FSS com janela eficiente [69]	31
Figura 24 – Utilização de uma FSS em uma etiqueta RFID semipassiva [72]	31
Figura 25 – Sistema RFID com etiqueta sem <i>chip</i> inspirada em FSS [73]	32

Figura 26 – Modelo do circuito equivalente [43]	33
Figura 27 – Configuração de medição para FSS [20]	34
Figura 28 – Utilização de lentes na configuração de medições [79]	35
Figura 29 – Utilização da câmara anecóica na configuração de medições [81]	36
Figura 30 – Janela de medição com absorvedores	36
Figura 31 – Célula básica da geometria matrioska	37
Figura 32 – Obtenção da geometria matrioska passa-faixa	38
Figura 33 – Matrioska com maior número de anéis	39
Figura 34 – Dimensões da célula básica matrioska.....	40
Figura 35 – Anel matrioska expandido	41
Figura 36 – CPW sem plano terra considerado para o cálculo da constante dielétrica efetiva	41
Figura 37 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização x	44
Figura 38 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y	45
Figura 39 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização x	47
Figura 40 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y	47
Figura 41 – Resposta em frequência, FSS01 e FSS02, polarização y , incidência normal ($\theta = 0^\circ$), resultados numéricos.....	50
Figura 42 – Configuração usada na caracterização experimental das FSS	51
Figura 43 – FSS01 fabricada	52
Figura 44 – FSS02 fabricada	52
Figura 45 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 0^\circ$).....	53
Figura 46 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 15^\circ$).....	54
Figura 47 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 30^\circ$).....	54
Figura 48 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 45^\circ$).....	55
Figura 49 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 0^\circ$).....	56
Figura 50 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 15^\circ$).....	57
Figura 51 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 30^\circ$).....	57
Figura 52 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 45^\circ$).....	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Evolução das FSS utilizando a geometria matrioska.....	17
Tabela 2 – Dimensões das FSS	43
Tabela 3 – Frequências de ressonância, FSS01, polarização x	45
Tabela 4 – Frequências de ressonância, FSS01, polarização y	46
Tabela 5 – Frequências de ressonância, FSS02, polarização x	48
Tabela 6 – Frequências de ressonância, FSS02, polarização y	49
Tabela 7 – Comparação dos resultados experimentais com numéricos, FSS01, polarização y	55
Tabela 8 – Comparação dos resultados experimentais com numéricos, FSS02, polarização y	58

Lista de Siglas e Símbolos

CAD	Projeto Assistido por Computador, <i>Computer Aided Design</i>
IP	Protocolo de Internet, <i>Internet Protocol</i>
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
FDTD	Diferenças finitas no domínio do tempo, <i>Finite - Difference Time - Domain</i>
FEM	Método dos elementos finitos, <i>Finite Element Method</i>
FR-4	Substrato de Fibra de Vidro, <i>Flame retardant</i>
FSS	Superfície seletiva em frequência, <i>Frequency Selective Surface</i>
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, <i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
MoM	Método dos Momentos, <i>Method of Moments</i>
RF	Rádio Frequência
RFSS	Superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis
WCIP	Método Iterativo das Ondas, <i>Wave Concept Iterative Procedure</i>
MEMS	Sistemas micro-eletromecânicos, <i>Micro Electro Mechanical Systems</i>
d_{x_1}	Comprimento da fenda na direção x
d_{y_1}	Comprimento da fenda na direção y
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
L_{eq1}	Comprimento equivalente 1
L_{eq2}	Comprimento equivalente 2
f_{res1}	Frequência de ressonância 1
f_{res2}	Frequência de ressonância 2
ϵ_{ref}	Constante dielétrica efetiva para um guia de ondas coplanar
h	Espessura do substrato dielétrico
L_s	Indutância em série
L_{x1}	Comprimento do anel 1 na direção x

L_{x2}	Comprimento do anel 2 na direção x
L_{x3}	Comprimento do anel 3 na direção x
L_{y1}	Comprimento do anel 1 na direção y
L_{y2}	Comprimento do anel 2 na direção y
L_{y3}	Comprimento do anel 3 na direção y
R_s	Resistência em série
W_x	Comprimento da célula na direção x
W_y	Comprimento da célula na direção y
λ_0	Comprimento de onda no espaço livre
θ	Ângulo de incidência
g	Espaçamento que secciona as laterais do anel matrioska
t	Espessura da camada de metalização
s	Altura do substrato
CPW	Guia de ondas coplanar, <i>Coplanar waveguide</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA	20
2.1 CLASSIFICAÇÕES DAS FSS	21
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO PREENCHIMENTO DA CÉLULA UNITÁRIA.....	21
2.1.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À GEOMETRIA DOS ELEMENTOS DA CÉLULA UNITÁRIA	23
2.1.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ESPESSURA DA CAMADA DE METALIZAÇÃO... ..	25
2.1.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À RECONFIGURAÇÃO DOS ARRANJOS	26
2.2 APLICAÇÕES DAS FSS.....	29
3. TÉCNICAS DE ANÁLISE.....	33
3.1 CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA	33
3.2 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL.....	34
4. GEOMETRIA MATHIOSKA PROPOSTA	37
5. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	43
5.1 RESULTADOS NUMÉRICOS	44
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	50
6. CONCLUSÃO	60
TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O intenso crescimento de aplicações que utilizam os sistemas de telecomunicações demanda cada vez mais a disponibilidade de bandas de frequência do espectro eletromagnético. Esse crescimento é determinado principalmente por tecnologias desenvolvidas para *tablets* e *smartphones*, sendo o espectro eletromagnético disputado por diversos serviços, tais como veículos aéreos não tripulados, radar veicular, sistemas de radionavegação, TV digital, serviços de Internet, enlaces terrestres, Internet das coisas (*IoT*) etc. [1]–[3]. Com o crescimento projetado das telecomunicações para os próximos anos, impulsionado principalmente pelas aplicações em banda larga, as tecnologias exigem conexões de alta capacidade e baixa latência [4].

Além da comunicação com o usuário final, é preciso prover enlaces de alta capacidade que possam conectar diferentes pontos das redes de telecomunicações. Embora vários desses enlaces sejam ópticos, é indispensável a utilização de enlaces via rádio. Nesse contexto, dadas as limitações da disponibilidade de torres e outros espaços para instalação de antenas, vários sistemas de telecomunicações, com seus próprios requisitos de frequência e potência, compartilham espaços restritos [5], Figura 1.

Figura 1 - Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços



Fonte: [6]

Por outro lado, existem ainda ambientes específicos (hospitais, presídios, embaixadas etc.) que impõem restrições aos serviços de telecomunicações, ou ainda ambientes com uso intensivo de serviços de telecomunicações (centros comerciais, prédios de escritórios, etc.) que também requerem estratégias para limitar as interferências [7]–[10].

Diante dessa demanda, a utilização de superfícies seletivas em frequência, (*frequency selective surfaces*), FSS, vem atraindo a atenção de diversos grupos de pesquisa, basicamente para minimizar e/ou redirecionar sinais para aumentar a eficiência dos sistemas de telecomunicações [11]–[14].

As FSS são estruturas geralmente planares que apresentam uma resposta em frequência similar a dos filtros. Entre suas características podem ser citadas o baixo custo e as dimensões e o peso reduzidos. Além disso, podem ser integradas a outras partes dos sistemas de telecomunicações, o que as tornam bastante atrativas para, por exemplo, otimizar o desempenho das antenas. Um dos parâmetros de projeto das FSS com maior flexibilidade é a geometria do elemento da célula unitária. A partir das pesquisas realizadas no GTEMA-IFPB foram propostas novas geometrias, tais como a estrela de quatro braços [15] e a matrioska [16]. Entretanto, no caso da geometria matrioska, até o presente só foram estudadas FSS com resposta em frequência do tipo rejeita-faixa. A Tabela 1 apresenta um resumo da evolução das FSS utilizando a geometria matrioska.

Tabela 1 – Evolução das FSS utilizando a geometria matrioska

Ano	Título do trabalho	Observações:	Referência
2014	<i>Matrioska: uma proposta de geometria para FSS multibandas</i>	FSS tipo rejeita-faixa, dependente da polarização	[16]
2014	<i>Caracterização de FSS com geometria matrioska aberta</i>	FSS tipo rejeita-faixa, dependente da polarização, maior número de ressonâncias	[17]
2015	<i>Analysis of the resonant behavior of FSS using Matryoshka geometry</i>	Múltiplas ressonâncias e tamanho reduzido	[18]
2018	<i>A polarization independent frequency selective surface based on the Matryoshka geometry</i>	Miniaturização, independência de polarização	[19]
2019	<i>Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência baseadas na geometria matrioska independente da polarização</i>	Redução da frequência de ressonância, independência de polarização	[20]
2019	<i>Polarization Independent Triple-Band Frequency Selective Surface Based on Matryoshka Geometry</i>	FSS com frequência de banda tripla, independência de polarização	[21]
2019	<i>Dual-Band Band-Pass Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry with Angular Stability and Polarization Independence</i>	FSS passa-faixa, independência de polarização, operação multibanda, estabilidade angular	[22]
2019	<i>Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska</i>	Independência de polarização e do ângulo de incidência, desacoplamento entre as geometrias associadas	[23]
2020	<i>Desenvolvimento de FSS com resposta passa-faixa baseada na geometria matrioska</i>	FSS passa-faixa, miniaturização, independência de polarização e do ângulo de incidência, operação multibanda	Este trabalho

A denominação geometria matrioska vem das bonecas russas matrioskas, que são constituídas por uma série de bonecas colocadas umas dentro das outras, expandindo-se da mais externa (maior) até a mais interna (menor) ocupando apenas o volume da boneca mais externa [16],[17].

Figura 2 - Exemplos de bonecas matrioska



Fonte: [24]

Na geometria matrioska, diferente dos anéis concêntricos, os anéis permanecem interligados, formando um único anel, Figura 3, aumentando o seu comprimento efetivo e, conseqüentemente, reduzindo a frequência de ressonância. Note que uma das características da geometria matrioska é a continuidade do anel, ou seja, é possível partir de um determinado ponto do anel e retornar a esse mesmo ponto, sem descontinuidade ou superposição. Porém, inicialmente essa geometria era limitada por ser dependente da polarização, o que a tornava inconveniente para algumas aplicações. Em [19],[20], foi proposta uma nova geometria matrioska, Figura 4, dessa vez independente da polarização e do ângulo de incidência. Contudo, os trabalhos realizados até o presente são de FSS baseadas na geometria matrioska, com resposta em frequência do tipo rejeita-faixa.

Figura 3 - Geometria matrioska



(a) Matrioska com 4 anéis



(b) Matrioska com os anéis expandidos

Fonte: [17]

Figura 4 – Nova geometria matrioska



Fonte: [20]

De maneira complementar, as FSS com resposta em frequência tipo passa-faixa desempenham um importante papel nos sistemas de telecomunicações, com aplicações em tecnologia 5G, radomes, subrefletores de antenas, blindagem eletromagnética, janelas eficientes, prédios eletromagneticamente inteligentes, filmes de blindagem RF para janelas, entre outras [25] – [31]. Assim sendo, nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento de uma FSS baseada na geometria matrioska, com resposta passa-faixa, preservando as características de miniaturização, operação multibanda e independência da polarização e do ângulo de incidência.

Este trabalho é dividido da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos sobre as FSS, sendo descritos seus parâmetros e características como espessura, comprimento e substrato, assim como, grupos de geometria e classificações. Também são descritas algumas aplicações.

As principais técnicas de análise são apresentadas no Capítulo 3.

No Capítulo 4 é apresentada a geometria proposta, com a descrição do projeto e suas equações iniciais de projeto.

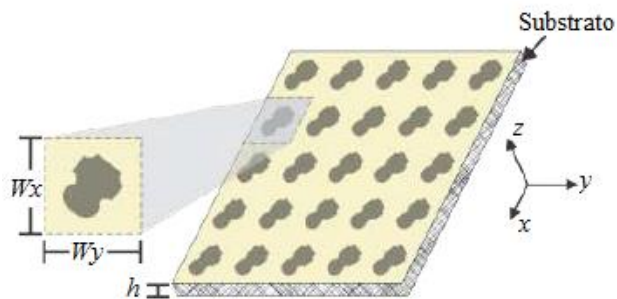
No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e também as sugestões de trabalhos futuros para a continuidade dessa pesquisa.

CAPÍTULO 2

SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA

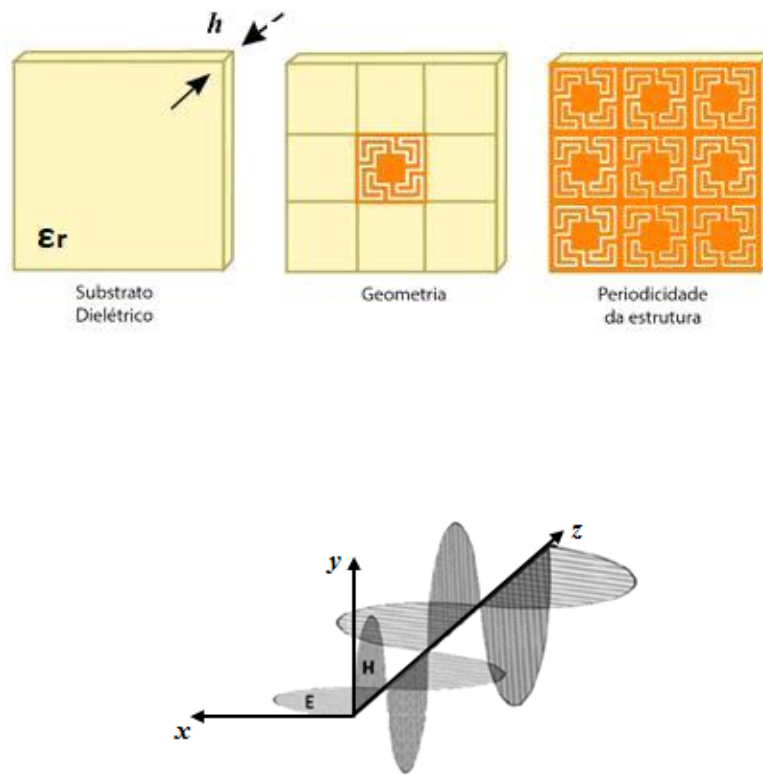
As superfícies seletivas em frequência são arranjos periódicos, que apresentam comportamento similar ao de filtros eletromagnéticos, como exemplificado na Figura 5. Embora possam ser tridimensionais, [32], [33], nesta dissertação serão consideradas apenas as FSS planares, ou seja, quando uma das dimensões é muito menor que o comprimento de onda no espaço livre correspondente à frequência de ressonância. Estas estruturas são projetadas com a finalidade de refletir ou deixar passar ondas eletromagnéticas em faixas de frequências diferenciadas [34] – [37]. Tais características podem ser observadas de acordo com o tipo do elemento utilizado no arranjo, seja do tipo *patch* ou abertura, que influenciam diretamente na resposta em frequência da FSS, podendo apresentar características rejeita-faixa ou passa-faixa, respectivamente [35], [36], [38], [39]. Além do tipo de elemento, as características do dielétrico sobre o qual a FSS é impressa, a geometria, a periodicidade do arranjo, a polarização e o ângulo de incidência da onda plana, Figura 6, são fatores que afetam o desempenho e a resposta em frequência de uma FSS [40], [41].

Figura 5 - Modelo básico de uma FSS



Fonte: [15]

Figura 6 - Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS



Fonte: Autor

2.1 CLASSIFICAÇÕES DAS FSS

As FSS podem ser classificadas de diversas maneiras: de acordo com o preenchimento da célula unitária; pela geometria do elemento da célula básica, pela espessura da camada de metalização e pela reconfiguração dos arranjos. Estes são aspectos clássicos encontrados na literatura para classificação de FSS [36].

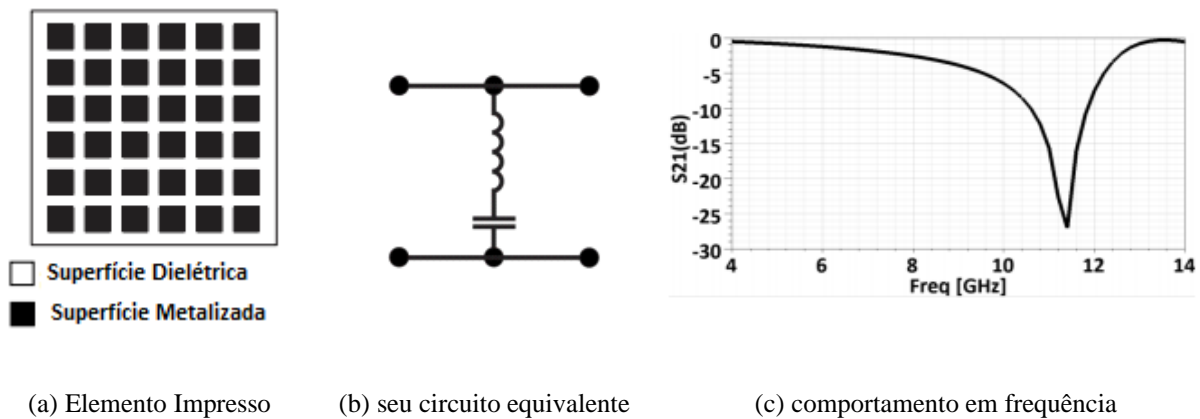
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO PREENCHIMENTO DA CÉLULA UNITÁRIA

A caracterização da FSS pode ser realizada com base no preenchimento da célula unitária, em que o elemento básico do arranjo periódico pode ser do tipo condutor ou do tipo abertura.

Para a geometria tipo condutor, ou *patch*, a FSS se comporta de forma semelhante a um filtro rejeita-faixa, pois à medida que os elementos entram em ressonância, o arranjo irradia a potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura, a FSS se comporta como um condutor perfeito refletindo praticamente toda a onda incidente, Figura 7.

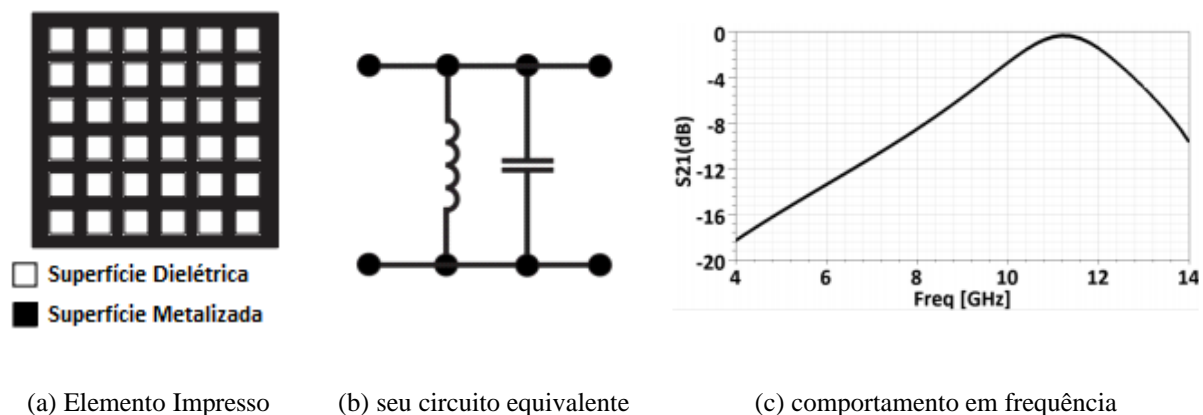
Para a geometria tipo abertura, ou *slot*, a FSS se comporta similarmente a um filtro passa-faixa, pois ao entrar em ressonância, esta estrutura torna-se praticamente “transparente” para a onda incidente, ocorrendo na frequência de ressonância a transmissão da onda plana incidente, Figura 8 [42].

Figura 7 - FSS do tipo *patch*



Fonte: [43]

Figura 8 - FSS do tipo abertura



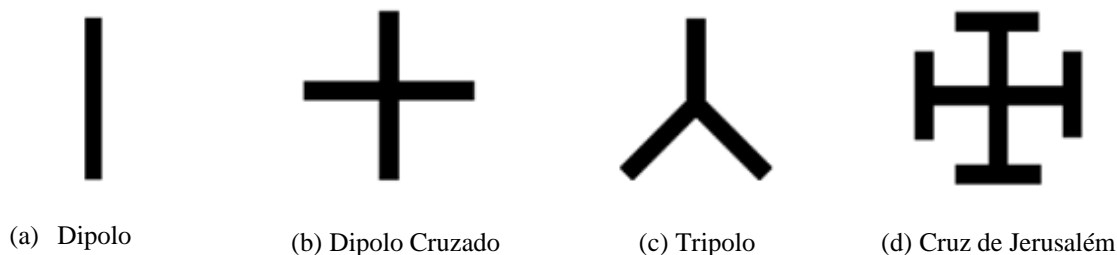
Fonte: [43]

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À GEOMETRIA DOS ELEMENTOS DA CÉLULA UNITÁRIA

Outra forma de classificação das FSS é através da geometria de seus elementos. Como dito anteriormente, a geometria do elemento básico é um dos parâmetros que influenciam na resposta em frequência das FSS [36]. Isso torna a geometria da célula básica um dos elementos mais ajustáveis no projeto das FSS. Estes elementos podem ser divididos em quatro grupos principais [36].

Grupo 1: formado pelos elementos do tipo N-polos conectados pelo centro, Figura 9. Exemplos: dipolo fino, dipolo cruzado, tripolo e a cruz de Jerusalém.

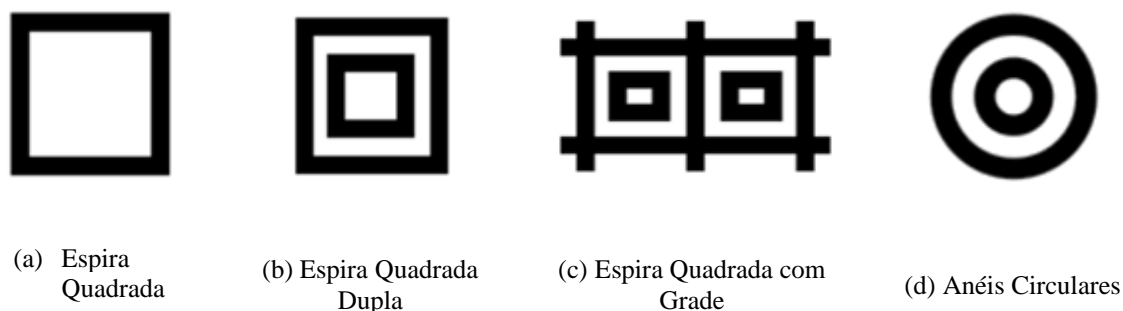
Figura 9 - Elementos do Grupo 1



Fonte: [11]

Grupo 2: formado pelos elementos do tipo espiras, Figura 10. Exemplos: espira quadrada, espira quadrada dupla, espira quadrada com grade e anéis circulares concêntricos.

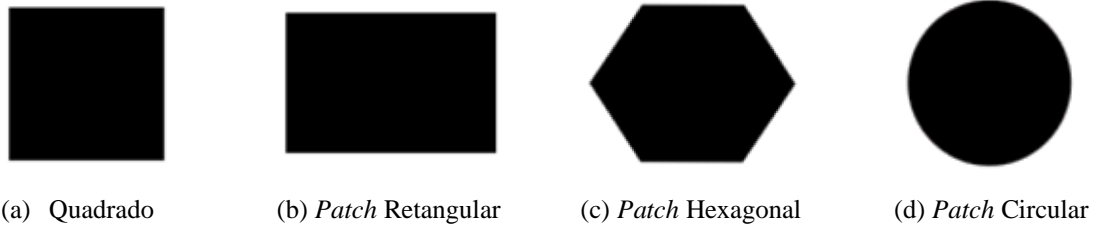
Figura 10 - Elementos do Grupo 2



Fonte: [11]

Grupo 3: reúne os elementos de interior sólido, Figura 11. Exemplos: *patches* quadrados, retangulares e circulares e outros.

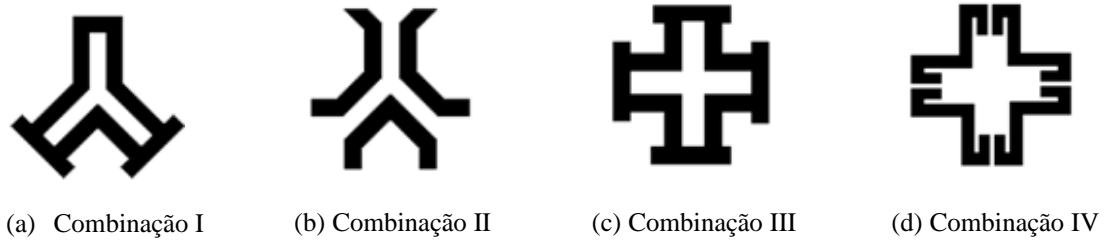
Figura 11 - Elementos do Grupo 3



Fonte: [11]

Grupo 4: reúne os elementos composto por elementos formados a partir de combinações de dois ou três elementos pertencentes aos outros grupos, Figura 12.

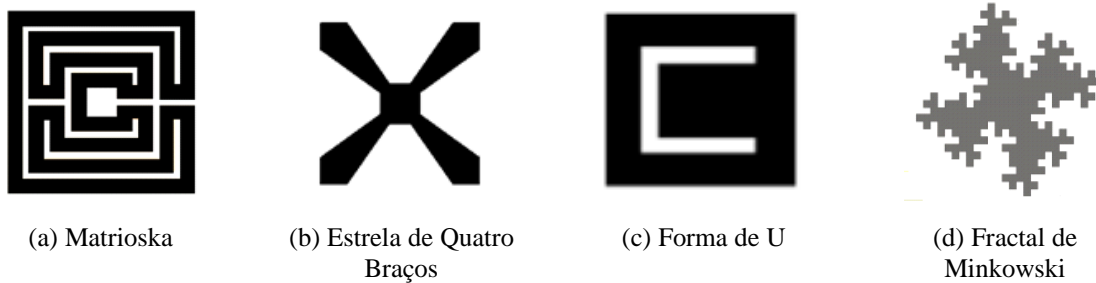
Figura 12 - Elementos do Grupo 4



Fonte: [11]

No GTEMA-IFPB vem sendo realizados estudos no sentido de identificar geometrias a serem implementadas em FSS. As geometrias matrioska [42], a estrela de quatro braços [44], em forma de U [43] e fractal [44] são exemplos dessas geometrias investigadas, Figura 13.

Figura 13 - Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB



Fonte: [42]

Fonte: [44]

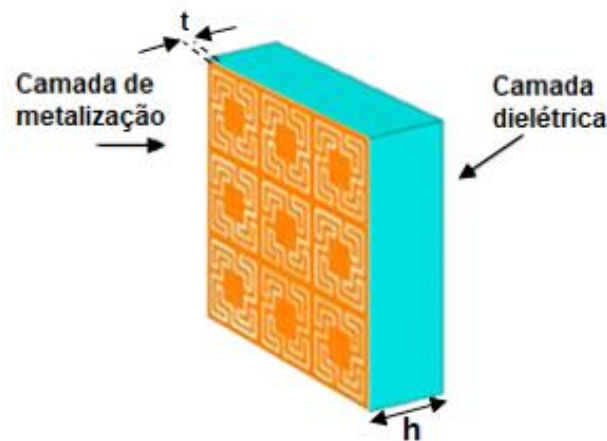
Fonte: [43]

Fonte: [44]

2.1.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ESPESSURA DA CAMADA DE METALIZAÇÃO

As FSS também podem ser classificadas de acordo com a espessura de sua camada de metalização t , Figura 14, podendo ser do tipo anteparo fino ou anteparo espesso. As FSS do tipo anteparo fino são aquelas que possuem uma camada de metalização de espessura menor que $0,001\lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda para a frequência de ressonância da FSS. As FSS do tipo anteparo fino apresentam a vantagem de serem leves, com pequeno volume e podem ser fabricadas por técnicas de circuito impresso, o que corresponde a um baixo custo [11], [42].

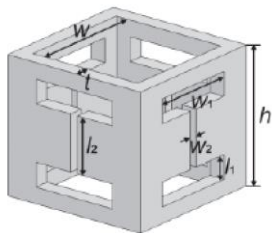
Figura 14 - Representação de uma FSS de anteparo fino



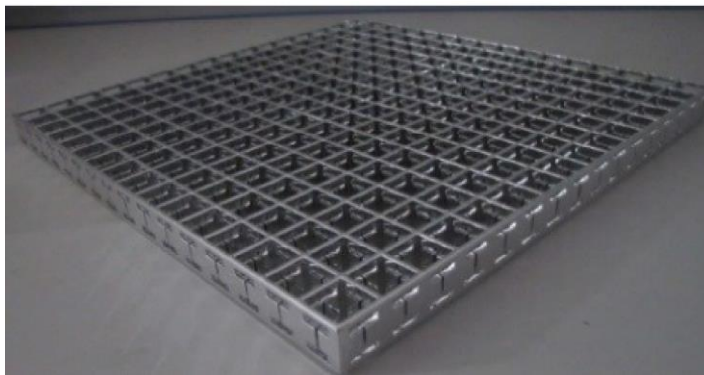
Fonte: [19]

As FSS de anteparo espesso possuem uma camada de metalização mais espessa, Figura 15. Entre as vantagens das FSS de anteparo espesso, estão a transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*. No entanto, esse tipo de FSS apresenta como desvantagens custos mais elevados, peso maior e processo de fabricação mais complexo, quando comparado à FSS de anteparo fino [45], [46].

Figura 15 – FSS de anteparo espesso



a) Célula unitária



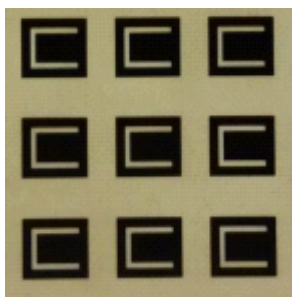
b) FSS fabricada

Fonte: [47]

2.1.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À RECONFIGURAÇÃO DOS ARRANJOS

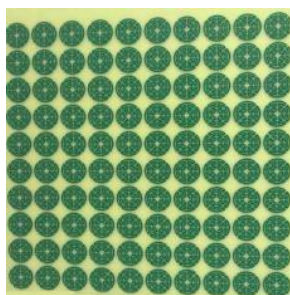
As FSS também podem ser classificadas quanto à reconfiguração do seu arranjo, podendo ser passivas, ou simplesmente FSS, ou reconfiguráveis, RFSS. As FSS passivas, apresentam uma resposta em frequência fixa e têm como vantagens as facilidades de projeto e fabricação [37], Figura 16.

Figura 16 – Exemplos de FSS passiva



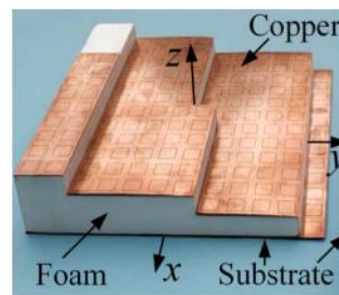
a) FSS passiva com geometria em forma de U

Fonte: [43]



b) FSS passiva de geometria matrioska circular

Fonte: [20]

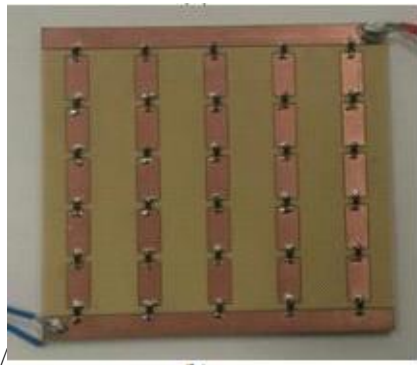


c) FSS multicamada

Fonte: [48]

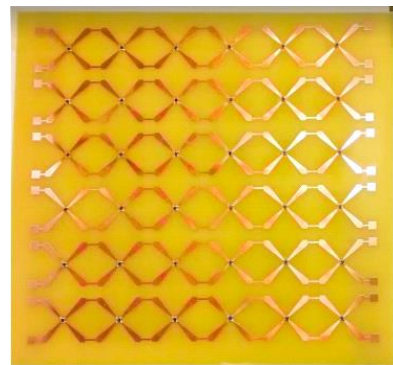
Uma das formas de reconfigurar uma FSS é através da incorporação de dispositivos ativos (diodos, varactores, chaves MEMS, a etc.), que quando polarizados alteram as características eletromagnéticas da FSS, [49] – [55], sendo essa forma denominada reconfiguração eletrônica.

Figura 17 – Exemplos de FSS eletronicamente reconfiguráveis



(a) FSS ativa usando diodos

Fonte: [56]

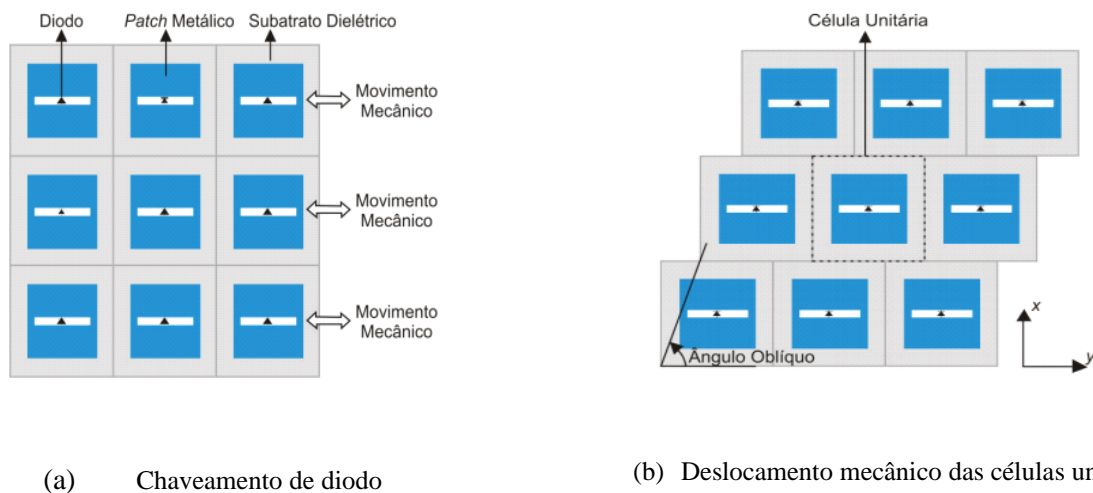


(b) FSS reconfigurável com geometria estrela de quatro braços usando diodo PIN

Fonte: [57]

Outra forma de reconfigurar uma FSS é através da mudança da disposição do arranjo mecanicamente [58] – [61]. A Figura 18 apresenta duas técnicas para projetar uma RFSS. Uma das formas abordadas foi citada acima, usando diodo entre as partes metálicas dos elementos da FSS, Figura 18 (a), a outra técnica consiste na mudança da disposição do arranjo mecanicamente, Figura 18 (b).

Figura 18 – Exemplo de FSS reconfigurável eletronicamente e mecanicamente



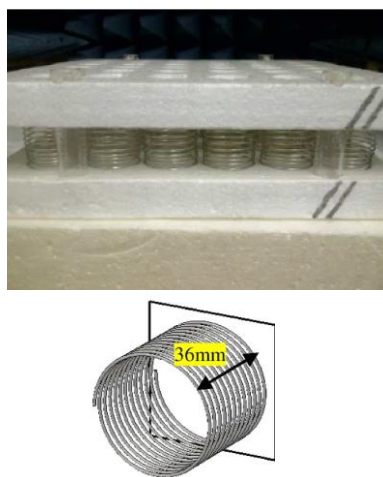
(a) Chaveamento de diodo

(b) Deslocamento mecânico das células unitárias

Fonte: [56],[60]

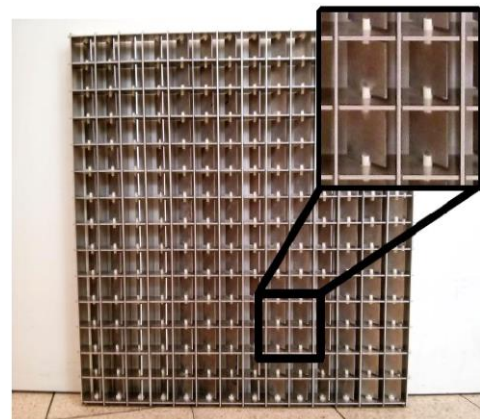
Na Figura 19 (a), temos uma FSS usando um ressonador de mola onde haverá variação na mola, mudando assim a resposta da FSS. Enquanto na Figura 19 (b), apresenta-se uma FSS 3D mecanicamente ajustável, nessa estrutura tem um elemento interno móvel que fornece a capacidade de ajuste para a estrutura da célula quadrada.

Figura 19 – Exemplos de FSS reconfiguráveis mecanicamente



(a) FSS usando ressonador de mola

Fonte: [61]



(b) FSS 3D mecanicamente ajustável

Fonte: [62]

2.2. APLICAÇÕES DAS FSS

As FSS possuem inúmeras aplicações, desde o uso em radomes e sub-refletores de antenas parabólicas até sensores sem fio. A seguir são apresentadas algumas aplicações de FSS.

Uma das aplicações mais conhecidas das FSS é como anteparo da porta do forno de micro-ondas, Figura 20, que funciona como um filtro, permitindo passar a faixa de frequência da luz visível e rejeitando a faixa de micro-ondas (em torno de 2,45 GHz) [63].

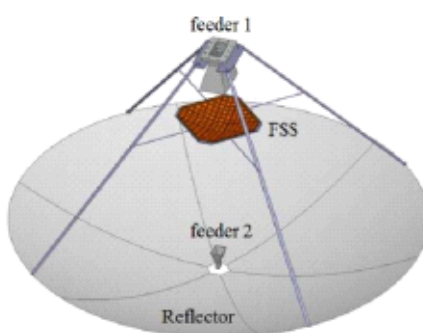
Figura 20 – FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas



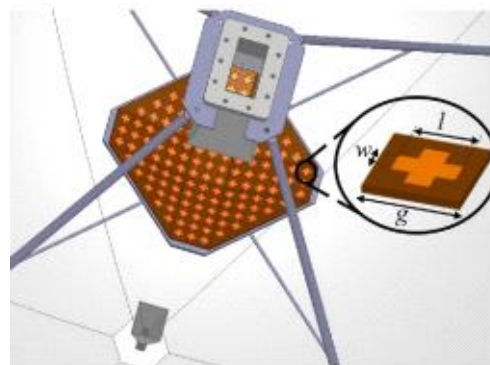
Fonte: [43]

Outra aplicação são as antenas de banda dupla onde a FSS é utilizada como sub-refletor, Figura 21 [64] – [66].

Figura 21 – Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS



(a) Perfil do sub-refletor

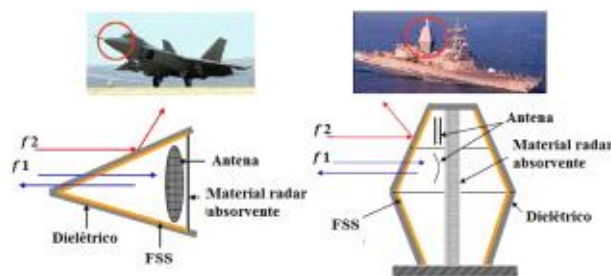


(b) Sub-refletor aproximado

Fonte: [64]

As FSS também podem ser inseridas como radome fornecendo características passa-faixa [11],[35], ou seja, o sinal na frequência de operação da antena passa através do radome com um mínimo de perdas de inserção e fora da banda do sinal é refletido, evitando-se interferências indesejadas. A Figura 22 mostra exemplos de FSS sendo utilizadas como radomes.

Figura 22 – Exemplos de usos de radomes

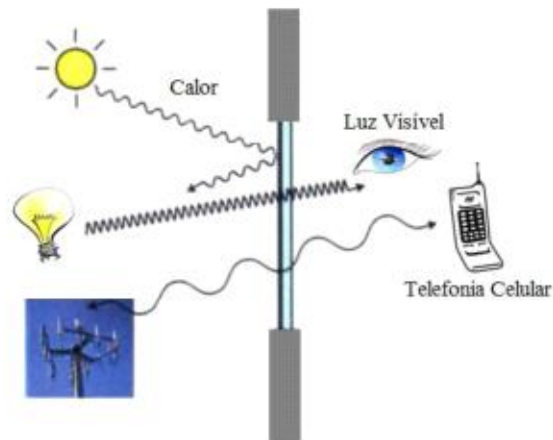


Fonte: [67]

Outra aplicação interessante é o uso de FSS com células coletoras de energia solar [34], [42]. Neste caso, a FSS é um anteparo passa-faixa, que atua deixando passar apenas a faixa de frequência em que as células solares são mais eficientes e refletindo as frequências fora dessa faixa [35], [68].

As FSS também podem ser usadas como janelas eficientes. Atuando como um filtro, a FSS bloqueia a radiação eletromagnética na região do infravermelho e é transparente a parte visível do espectro, rejeitando a transferência de calor de fora para dentro do ambiente [69], conforme a Figura 23.

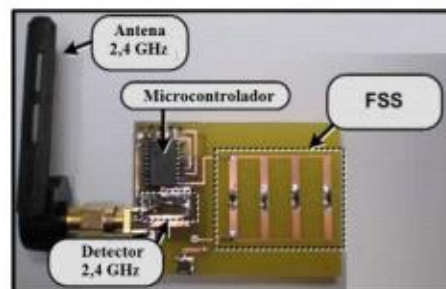
Figura 23 – Aplicação de FSS com janela eficiente



Fonte: [69]

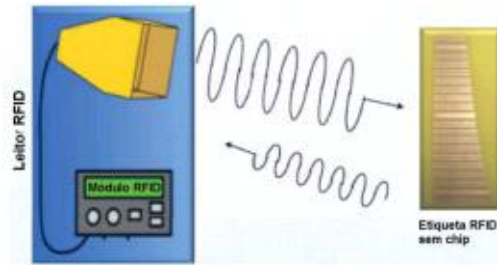
Os princípios das FSS também podem ser utilizados em sistemas de RFID sem chip, conhecidas como *chipless tags*, Figura 24. Essas etiquetas apresentam um menor custo de fabricação, pois não possuem circuito integrado para armazenamento de dados e não requerem fonte própria de energia [70], [71]. A Figura 25 ilustra o funcionamento de uma etiqueta RFID sem *chip*, onde o leitor envia para a etiqueta uma onda com algumas frequências predefinidas e verifica através das ondas refletidas pela etiqueta a ausência ou presença dessas frequências. Com base nessa informação realiza a codificação dos dados.

Figura 24 – Utilização de uma FSS em uma etiqueta RFID semipassiva



Fonte: [72]

Figura 25 – Sistema RFID com etiqueta sem *chip* inspirada em FSS



Fonte:[73]

Nesta dissertação, será utilizada uma FSS passiva com resposta passa faixa baseada na geometria matrioska.

CAPÍTULO 3

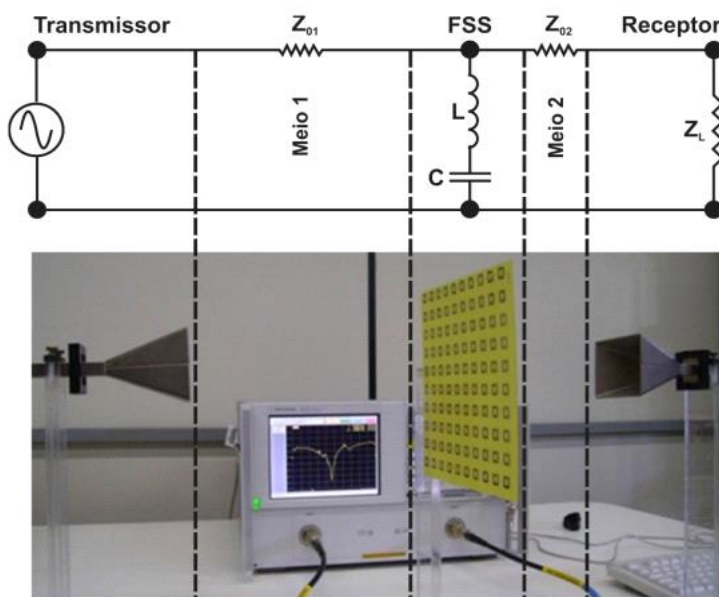
TÉCNICAS DE ANÁLISE

O desenvolvimento de uma FSS envolve, basicamente, duas etapas: caracterização numérica e caracterização experimental. A seguir são apresentadas algumas das técnicas de caracterização utilizadas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA

Várias técnicas numéricas têm sido usadas em análises de FSS. Fórmulas aproximadas e simples foram desenvolvidas por alguns autores, para se determinar características de transmissão e reflexão para uma FSS com *patches* condutores ou aberturas retangulares. Este tipo de análise diminui o tempo computacional e produz resultados satisfatórios para determinadas estruturas [74], [75]. Um dos métodos utilizados é o método do circuito equivalente. Nesse método um circuito LC, Figura 26, é utilizado para representar a espessura do substrato, as dimensões do elemento e a geometria utilizada. No entanto, para geometrias mais complexas, ou modos de ordem superior, esse método torna-se inviável.

Figura 26 – Modelo do circuito equivalente



Fonte: [43]

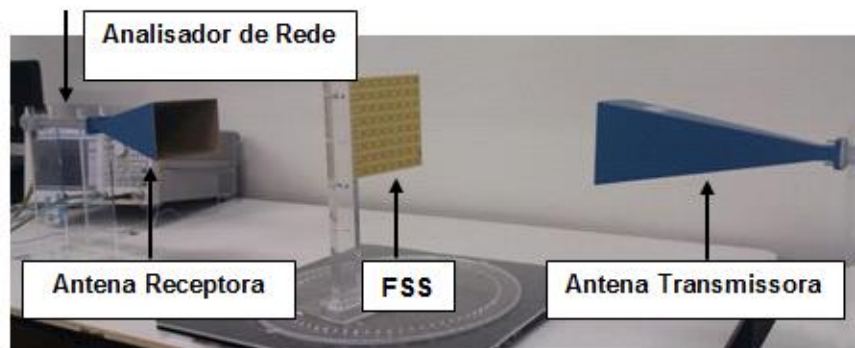
Com a maior disponibilidade de recursos computacionais, vários métodos numéricos passaram a ser utilizados na caracterização das FSS. Entre esses métodos, podem ser citados:

- Método das diferenças finitas no domínio do tempo (*Finite-Difference Time-Domain* – FDTD) [76];
- Método dos elementos finitos (*Finite Element Method* – FEM) [76];
- Método dos momentos (*Method of Moments* – MOM) [77];
- Método iterativo das ondas (*Wave Concept Iterative Procedure* – WCIP) [78].

3.2 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Alguns métodos são empregados para medir as propriedades de transmissão e reflexão das FSS. Após a caracterização numérica, os resultados precisam ser validados com a fabricação e caracterização experimental das FSS. Uma das configurações de medição mais utilizadas é o conjunto formado por duas antenas cornetas e uma FSS entre elas, Figura 27. As antenas são conectadas a um analisador de redes e assim o comportamento em frequência da FSS pode ser obtido:

Figura 27 – Configuração de medição para FSS

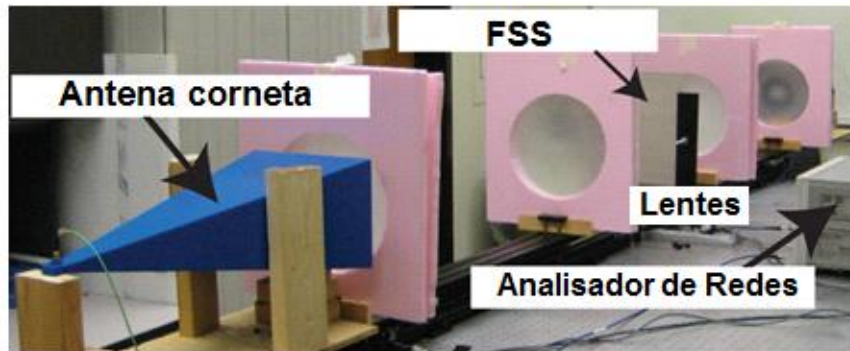


Fonte: [20]

Considerando o tamanho da FSS em relação ao comprimento de onda, alguns artifícios podem ser utilizados para diminuir os efeitos causados pela difração das bordas das FSS e/ou pela

presença de sinais refletidos no ambiente de medição. Um desses artifícios é focalizar o feixe de onda no centro da FSS, utilizando lentes em conjunto com as antenas cornetas, Figura 28 [37].

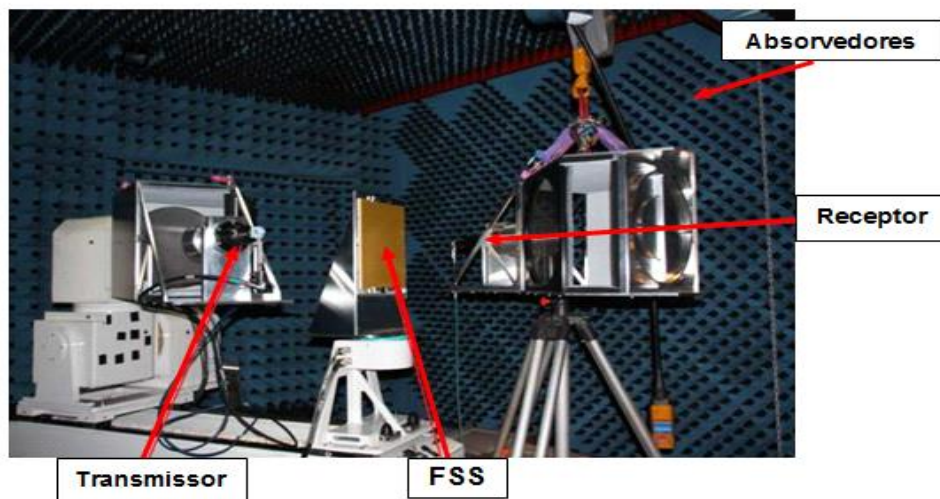
Figura 28 - Utilização de lentes na configuração de medições



Fonte: [79]

Medições mais precisas podem ser realizadas com a utilização de painéis absorvedores, tais como os presentes em câmeras anecóicas, Figura 29, que garantem um ambiente praticamente livre de interferências [80]. Outra possibilidade é a utilização de uma janela de medição, Figura 30, onde uma superfície condutora é limitada por absorvedores. Nessa superfície é deixada uma janela para que nela seja colocada a FSS a ser caracterizada, sendo a configuração utilizada neste trabalho.

Figura 29 – Utilização da câmera anecóica na configuração de medições



Fonte: [81]

Figura 30 – Janela de medição com absorvedores



Fonte: Autor

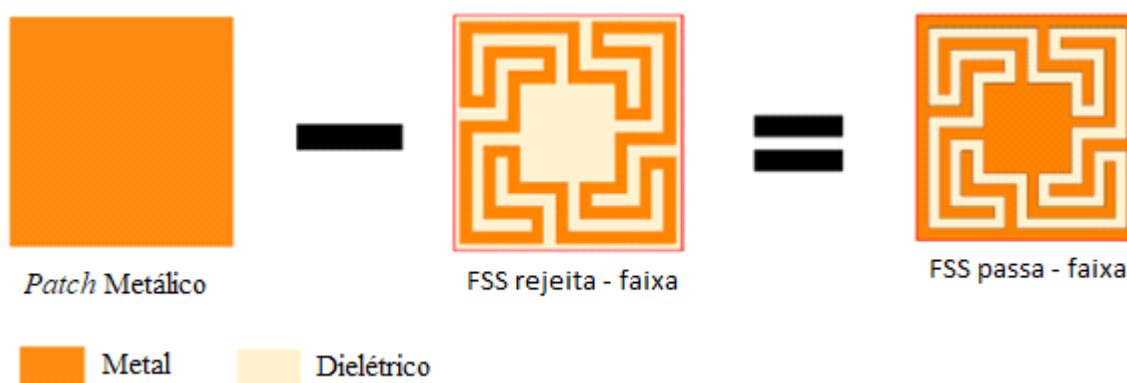
Nesta dissertação, a configuração utilizada é composta por: duas antenas, um analisador de redes, um absorvedor junto a janela de medição e uma FSS, conforme ilustrado na Figura 30.

CAPÍTULO 4

GEOMETRIA MATRIOSKA PROPOSTA

A geometria matrioska proposta neste trabalho é baseada na geometria apresentada em [19] e [20], optando-se por implementá-la no formato quadrado por ser de fabricação mais simples. É considerado que a FSS é implementada sobre um substrato de espessura h e permissividade ϵ_r . Para obter-se uma resposta em frequência do tipo passa faixa, é utilizada uma geometria complementar, Figura 31.

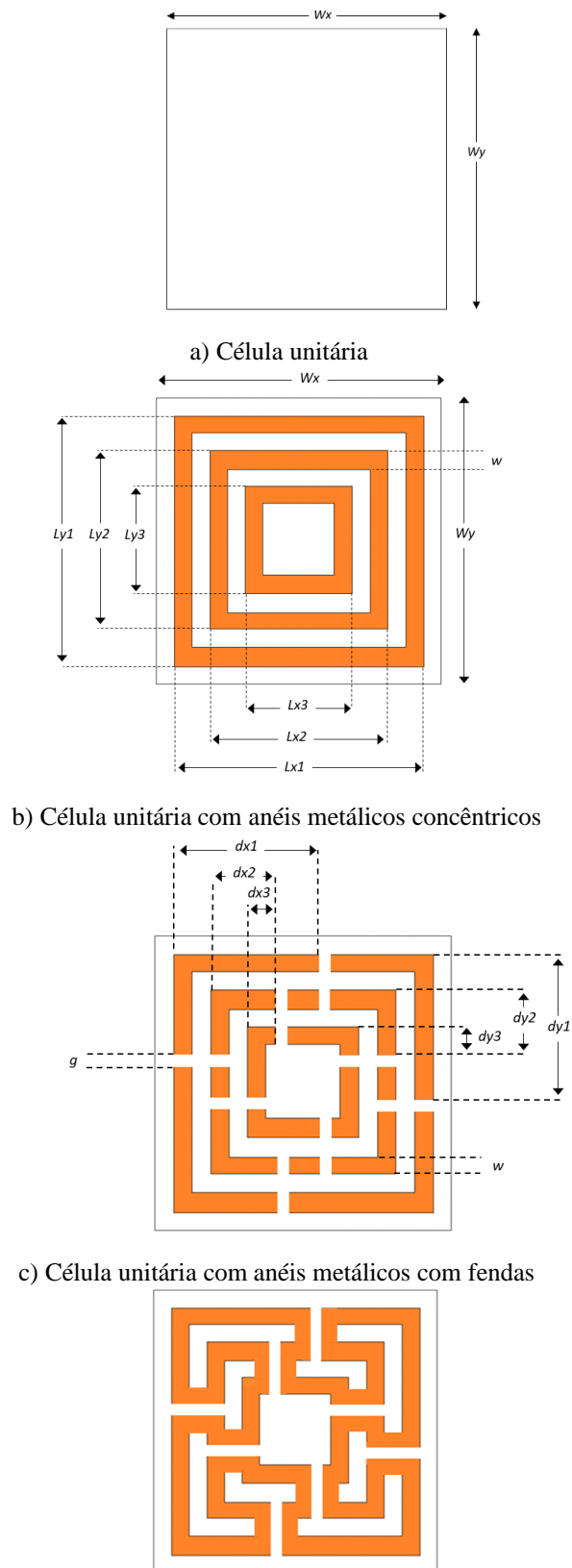
Figura 31 – Célula básica da geometria matrioska



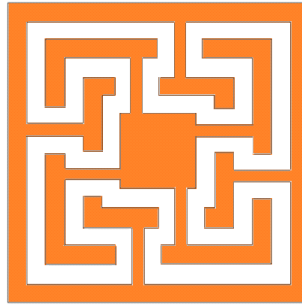
Fonte: Autor

Como ilustrado na Figura 31, uma maneira de se obter a geometria matrioska com resposta passa-faixa é a partir da geometria rejeita-faixa complementar, como será descrito a seguir. Inicialmente uma célula unitária é dimensionada, determinando a periodicidade da FSS, Figura 32 (a). Essa periodicidade é relacionada ao fator de preenchimento, às limitações dos modos de grade, etc. Em seguida, anéis metálicos quadrados concêntricos são introduzidos, como ilustrado na Figura 32 (b). Fendas são inseridas nos mesmos pontos entre anéis consecutivos, Figura 32 (c) e em seguida os anéis são interligados, Figura 32 (d), obtendo-se a geometria matrioska rejeita-faixa. Concluindo, a geometria matrioska rejeita-faixa é subtraída de uma *patch* metálico, obtendo-se a geometria complementar, passa-faixa, Figura 32 (e).

Figura 32 – Obtenção da geometria matrioska passa-faixa



d) Célula unitária com anéis metálicos – Geometria matrioska com abertura em anel rejeita-faixa



e) Geometria matrioska com abertura em anel passa-faixa

Note que o número de anéis matrioska pode ser incrementado, Figura 33, obtendo-se uma redução ainda maior das frequências de ressonância, característica bastante interessante para o processo de miniaturização, e operação multibanda. Entretanto, vale destacar o incremento do número de anéis é limitado pelo processo de fabricação utilizado.

Figura 33 – Matrioska com maior número de anéis

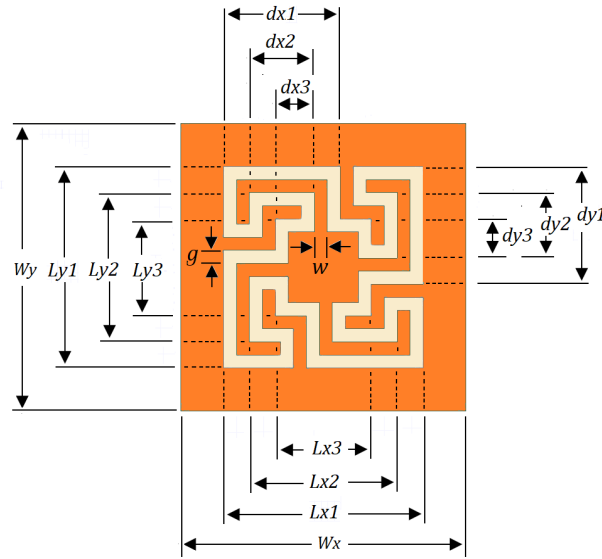


Fonte: Autor

A determinação das dimensões da geometria matrioska é um processo que requer a experiência do engenheiro de micro-ondas, que a partir dos valores iniciais realiza um processo de otimização numéricas até alcançar a resposta em frequência desejada. Entretanto, equações iniciais de projeto podem ser bastante úteis, pois possibilitam uma melhor escolha das dimensões iniciais.

Seja considerada a Figura 34.

Figura 34 – Dimensões da célula básica matrioska



Fonte: Autor

Usando a ideia do anel matrioska expandido [18], a célula unitária mostrada na Figura 34 pode ser vista como a superposição de três elementos de abertura, Figura 35, para os quais o comprimento equivalente (linhas tracejadas na Figura 35) é calculado por:

$$L_{eq1} = 2L_{x1} + 2L_{x2} + 2L_{x3} + 2L_{y1} - 4w \quad (1)$$

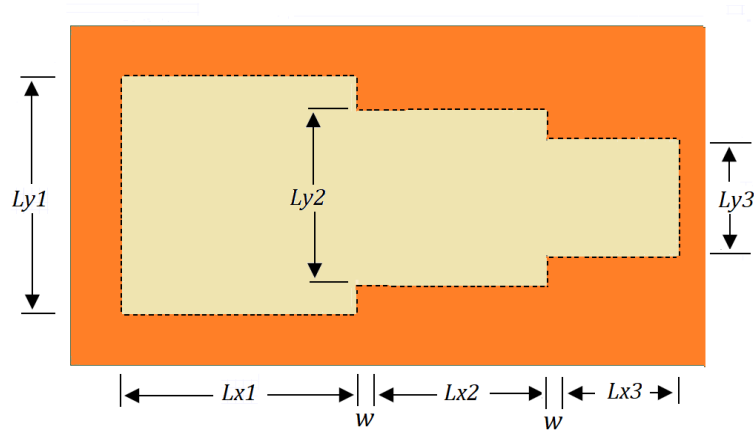
Para o anel matrioska expandido, a primeira frequência de ressonância pode ser aproximadamente determinada por:

$$f_{res1}(GHz) = \frac{0,3}{L_{eq1} \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (2)$$

Onde ϵ_{ref} é a constante dielétrica efetiva para um guia de ondas coplanar, CPW (*coplanar waveguide*) sem plano de terra [82], com $s=10 \times h$ e largura da fita central igual à

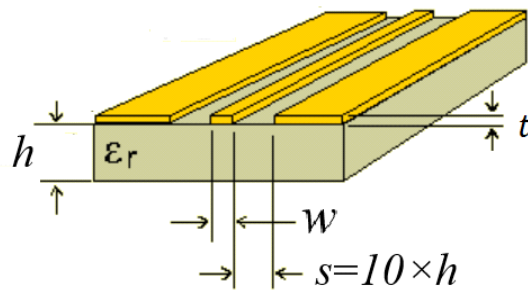
largura da fita do anel, w , Figura 36, que pode ser facilmente calculada usando um dos programas computacionais disponíveis [83]. O valor do ε_{ref} calculado foi igual a 1,61.

Figura 35 – Anel de matrioska expandido



Fonte: Autor

Figura 36 – CPW sem plano terra considerado para o cálculo da constante dielétrica efetiva



Fonte: Autor

Para a segunda ressonância, o comprimento equivalente pode ser estimado a partir de (3).

$$L_{eq2} = 2L_{x1} + 2L_{x2} + 2L_{x3} + 2L_{y1} - 8g \quad (3)$$

Pode-se estimar a segunda frequência de ressonância pela seguinte expressão:

$$f_{res2}(GHz) = \frac{0,3}{\frac{L_{eq2}}{2} \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (4)$$

Vale ressaltar que (1)–(4) são equações iniciais do projeto, um primeiro passo para uma otimização numérica e iterativa. A partir desses valores é possível encontrar uma diferença maior ou menor entre os resultados inicialmente estimados e os desejados. No entanto, a resposta em frequência necessária pode ser alcançada com relativa facilidade.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Neste Capítulo são apresentados os resultados numéricos e experimentais das FSS fabricadas. Embora as FSS apresentem múltiplas ressonâncias, a análise dos resultados será realizada apenas para as duas primeiras ressonâncias. Para as duas FSS é considerado um substrato de baixo custo FR-4, com 1,6 mm de espessura, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. As dimensões das FSS são resumidas na Tabela 2.

A FSS01 foi otimizada numericamente para apresentar duas frequências de ressonância, 1,52 GHz e 3,47 GHz, com frequência central de rejeição em 2,42 GHz. Por outro lado, a FSS02 foi otimizada para apresentar duas frequências de ressonância, 2,42 GHz e 5,11 GHz. A ideia principal é verificar se as ressonâncias podem ser ajustadas para se obter respostas em frequência com banda de passagem ou banda de rejeição em uma determinada faixa de frequência. Vale ressaltar aqui que, considerando apenas a primeira ressonância, as dimensões das células unitárias, são 22,4 mm \times 22,4 mm, para as FSS01($0,113\lambda_0 \times 0,113\lambda_0$) e FSS02 ($0,181\lambda_0 \times 0,181\lambda_0$), o que é um resultado interessante para uma FSS de camada única e banda dupla.

Tabela 2 – Dimensões das FSS

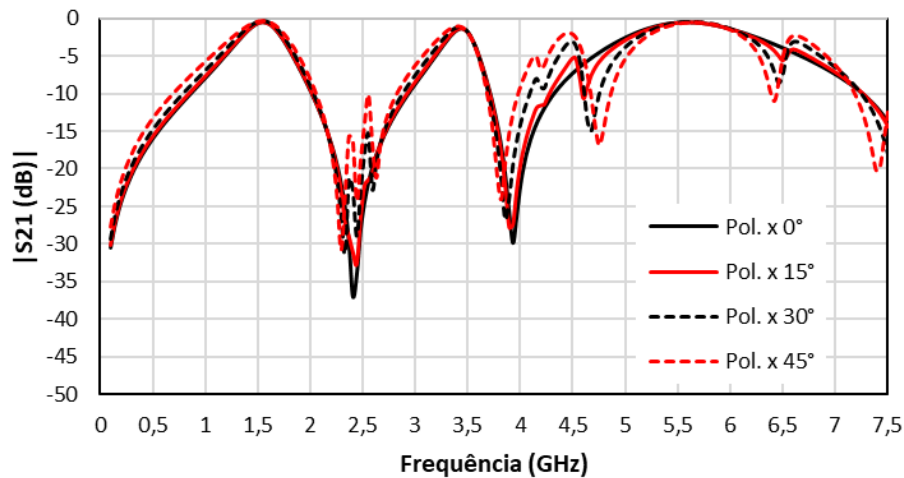
Dimensão (mm)	FSS01	FSS02
W_x	22,4	22,4
W_y	22,4	22,4
W	1,0	1,0
g	1,0	1,0
$L_1 = L_{x1} = L_{y1}$	20,4	15,4
$L_2 = L_{x2} = L_{y2}$	16,4	11,4
$L_3 = L_{x3} = L_{y3}$	12,4	7,4
$d_1 = d_{x1} = d_{y1}$	11,4	9,0
$d_2 = d_{x2} = d_{y2}$	7,4	5,0
$d_3 = d_{x3} = d_{y3}$	5,5	3,0

5.1 RESULTADOS NUMÉRIOS

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa ANSYS *Designer* [84], tendo sido consideradas as polarizações x e y , e o ângulo de incidência variando 0° a 45° .

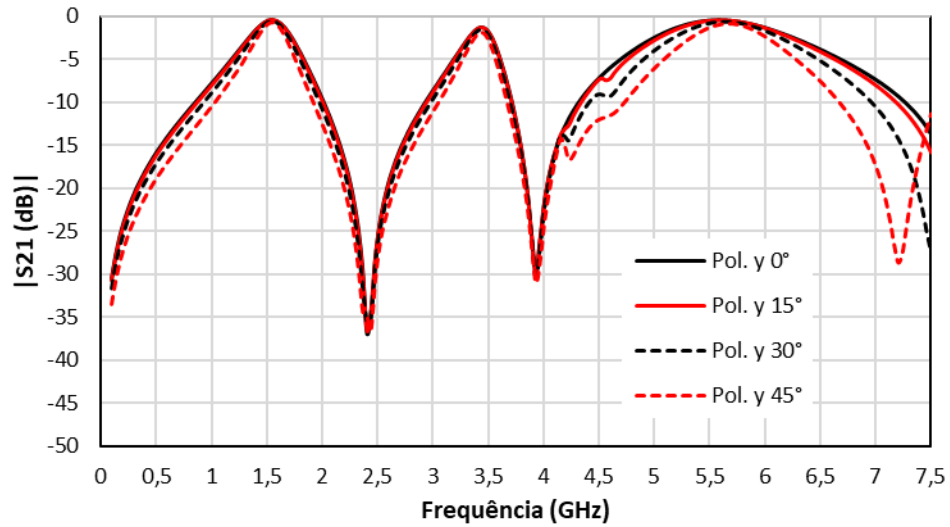
Nas Figuras 37 e 38 são apresentados os resultados numéricos obtidos para a FSS01, $|S_{21}|$ (dB) \times Frequência (GHz), polarizações x e y , respectivamente, com ângulos de incidência $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ e 45° . Esses resultados são resumidos nas Tabelas 3 e 4. Observe-se que nas Tabelas 3 e 4 os valores da frequência de ressonância calculados, correspondem à incidência perpendicular à FSS01, obtidos a partir das equações (1) – (4).

Figura 37 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS01, polarização x , resultado numérico



Fonte: Autor

Figura 38 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y, resultado numérico.



Fonte: Autor

Tabela 3 – Frequências de ressonância, FSS01, polarização x

	Ângulo de incidência	Numérico (GHz)	Calculado (GHz)	Diferença (%)
Freq. de ressonância 1	0°	1,58	1,63	3,06
Freq. de ressonância 2	0°	3,44	3,56	3,37
Freq. de ressonância 1	15°	1,58	1,63	3,06
Freq. de ressonância 2	15°	3,48	3,56	2,24
Freq. de ressonância 1	30°	1,58	1,63	3,06
Freq. de ressonância 2	30°	3,48	3,56	2,24
Freq. de ressonância 1	45°	1,62	1,63	0,61
Freq. de ressonância 2	45°	3,48	3,56	2,24

Na Tabela 3, da análise da polarização x , observa-se que as ressonâncias correspondentes à geometria matrioska permaneceram constantes quando comparadas com a incidência perpendicular.

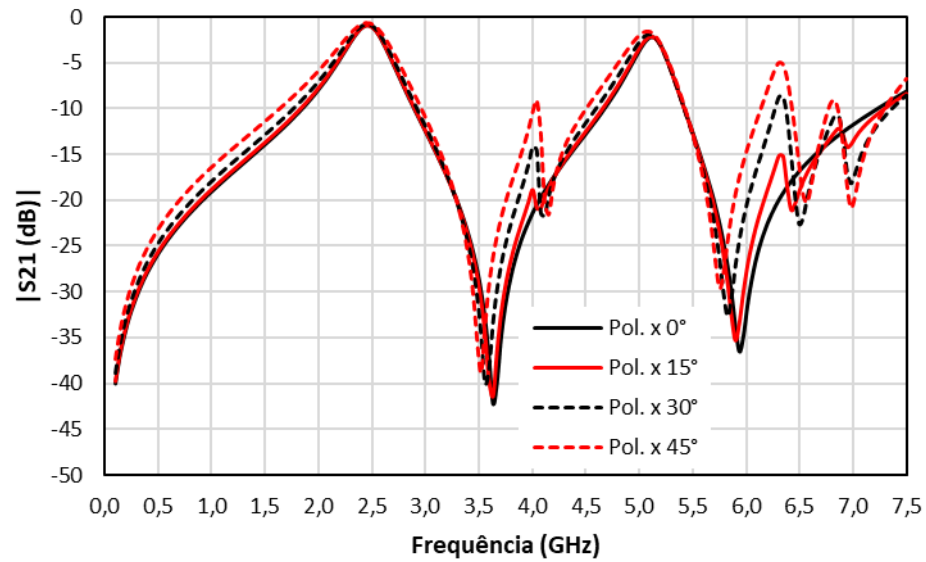
Tabela 4 – Frequências de ressonância, FSS01, polarização y

	Ângulo de incidência	Numérico (GHz)	Calculado (GHz)	Diferença (%)
Freq. de ressonância 1	0°	1,58	1,63	3,06
Freq. de ressonância 2	0°	3,48	3,56	2,24
Freq. de ressonância 1	15°	1,58	1,63	3,06
Freq. de ressonância 2	15°	3,44	3,56	3,37
Freq. de ressonância 1	30°	1,58	1,63	3,06
Freq. de ressonância 2	30°	3,48	3,56	2,24
Freq. de ressonância 1	45°	1,62	1,63	0,61
Freq. de ressonância 2	45°	3,48	3,56	2,24

Na Tabela 4, da análise da polarização y , observa-se que, analogamente à polarização x , as ressonâncias correspondentes à geometria matrioska permaneceram constantes quando comparadas com a incidência perpendicular. Demonstrando assim, nas Tabelas 3 e 4, que são valores satisfatórios para confirmar a independência da polarização e do ângulo de incidência.

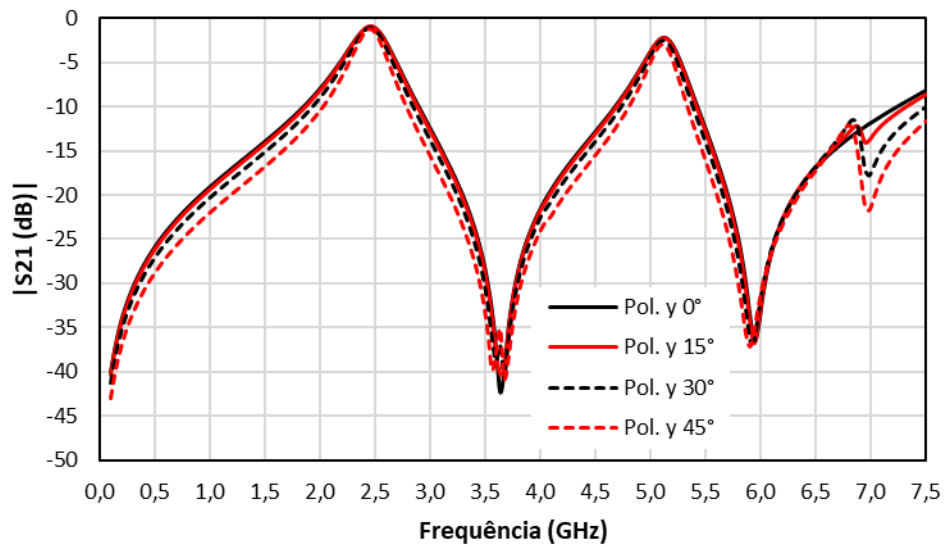
De maneira análoga, nas Figuras 39 e 40 são apresentados os resultados numéricos obtidos para a FSS02, polarizações x e y , respectivamente. Esses resultados são resumidos nas Tabelas 5 e 6.

Figura 39 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização x , resultados numéricos



Fonte: Autor

Figura 40 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y , resultados numéricos



Fonte: Autor

Tabela 5 – Frequências de ressonância, FSS02, polarização x

	Ângulo de incidência	Numérico (GHz)	Calculado (GHz)	Diferença (%)
Freq. de ressonância 1	0°	2,47	2,26	9,29
Freq. de ressonância 2	0°	5,12	5,12	0,00
Freq. de ressonância 1	15°	2,47	2,26	9,29
Freq. de ressonância 2	15°	5,11	5,12	0,19
Freq. de ressonância 1	30°	2,47	2,26	9,29
Freq. de ressonância 2	30°	5,12	5,12	0,00
Freq. de ressonância 1	45°	2,47	2,26	9,29
Freq. de ressonância 2	45°	5,08	5,12	0,78

Na Tabela 5, da análise da polarização x , observa-se que as ressonâncias correspondentes à geometria matrioska permaneceram praticamente constantes quando comparadas com a incidência perpendicular, sendo a maior variação de 0,8%, observada na segunda ressonância.

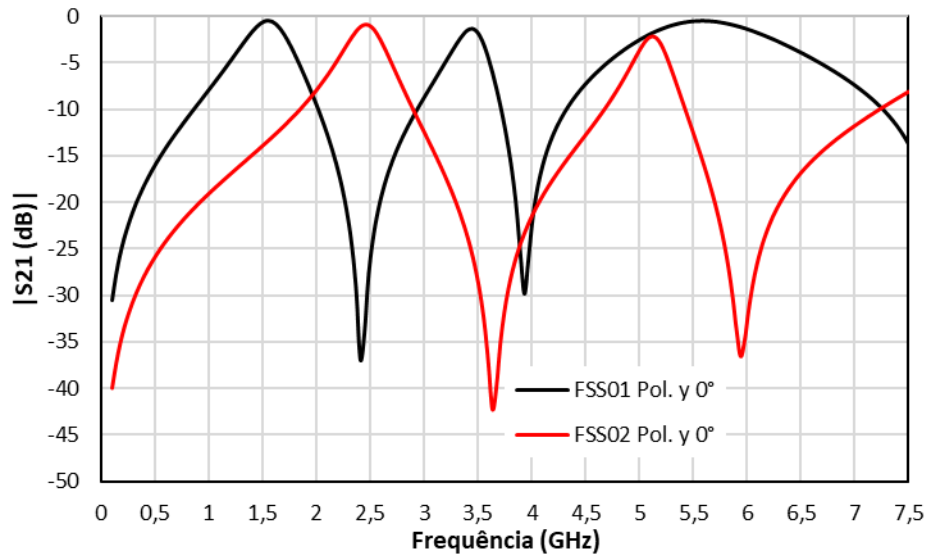
Tabela 6 – Frequências de ressonância, FSS02, polarização y

	Ângulo de incidência	Numérico (GHz)	Calculado (GHz)	Diferença (%)
Freq. de ressonância 1	0°	2,47	2,26	9,29
Freq. de ressonância 2	0°	5,12	5,12	0,00
Freq. de ressonância 1	15°	2,44	2,26	7,96
Freq. de ressonância 2	15°	5,12	5,12	0,00
Freq. de ressonância 1	30°	2,48	2,26	9,73
Freq. de ressonância 2	30°	5,12	5,12	0,00
Freq. de ressonância 1	45°	2,47	2,26	9,29
Freq. de ressonância 2	45°	5,15	5,12	0,58

Na Tabela 6, da análise da polarização y, observa-se que as ressonâncias correspondentes à geometria matrioska permaneceram constantes quando comparadas com a incidência perpendicular. Demonstrando assim, nas Tabelas 5 e 6 que são valores satisfatórios para confirmar a independência da polarização e ângulo de incidência.

Na Figura 41 são superpostos os resultados para as duas FSS, polarização y, incidência perpendicular à FSS, observando-se que na faixa de frequência em torno de 2,45 GHz é possível se obter tanto uma banda de rejeição, FSS01, como uma banda passante, FSS02.

Figura 41 – Resposta em frequência, FSS01 e FSS02, polarização y, incidência normal ($\theta = 0^\circ$), resultados numéricos

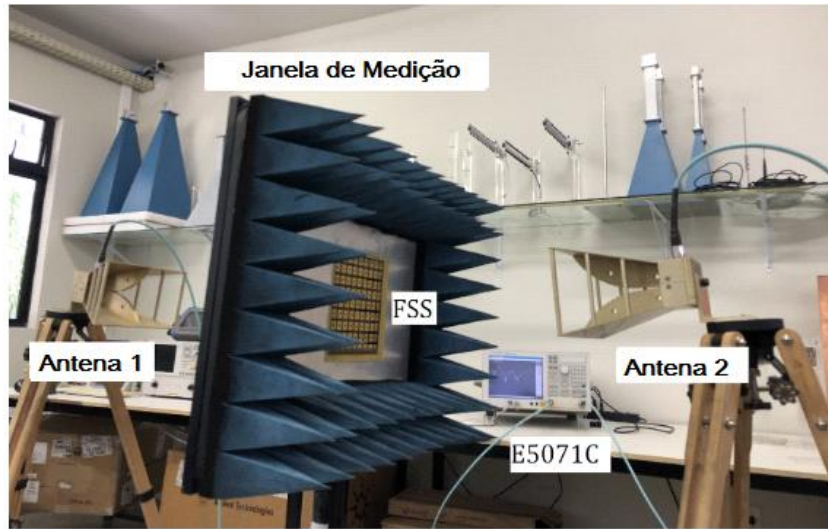


Fonte: Autor

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C [85], duas antenas do tipo corneta *double ridge guide* A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz) [86], e uma janela de medição, Figura 42.

Figura 42 – Configuração usada na caracterização experimental das FSS



Fonte: Autor

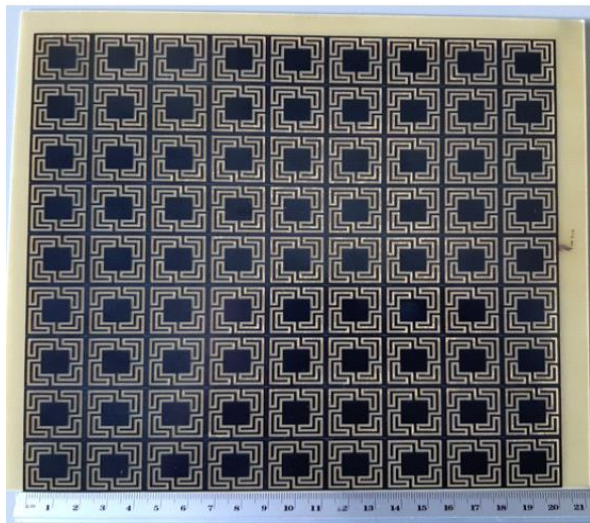
Os resultados da medição, $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, são apresentados para a faixa de frequência de 1,0 a 7,5 GHz, considerando diferentes ângulos de incidência $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ e 45° .

As duas FSS foram fabricadas de acordo com as dimensões especificadas na Tabela 2, em um substrato dielétrico de baixo custo (FR-4, $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas 0,02) conforme especificado. Cada FSS possui 9 x 9 células unitárias, cada célula unitária mede 22,4 mm \times 22,4 mm, correspondendo a uma largura total de 201,6 mm \times 201,6 mm. O *gap* e a largura da fita têm a mesma dimensão, $w = g = 1$ mm.

Cabe esclarecer que nos resultados experimentais só é considerada polarização y, pois como observado nos resultados numéricos, a geometria da FSS investigada é independente da polarização.

A primeira FSS, FSS01, possui $L1 = 20,4$ mm, $L2 = 16,4$ mm, $L3 = 12,4$ mm, $d1 = 11,4$ mm, $d2 = 7,4$ mm, e $d3 = 5,5$ mm, Figura 43.

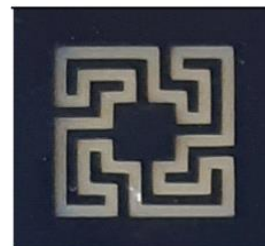
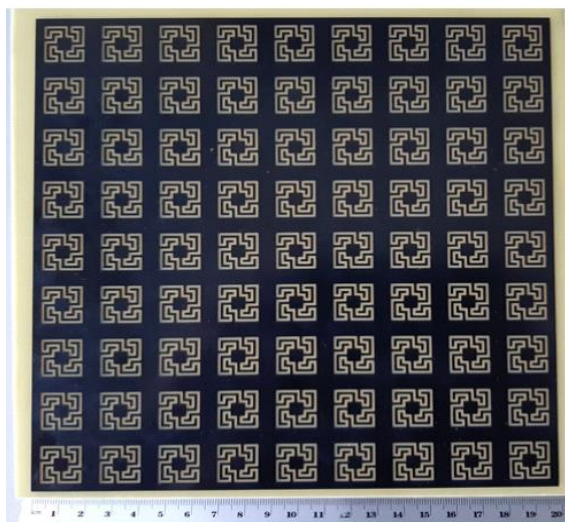
Figura 43 – FSS01 fabricada



Fonte: Autor

A segunda FSS, FSS02, possui $L1 = 15,4$ mm, $L2 = 11,4$ mm, $L3 = 7,4$ mm, $d1 = 9,0$ mm, $d2 = 5,0$ mm, e $d3 = 3,0$ mm, Figura 44.

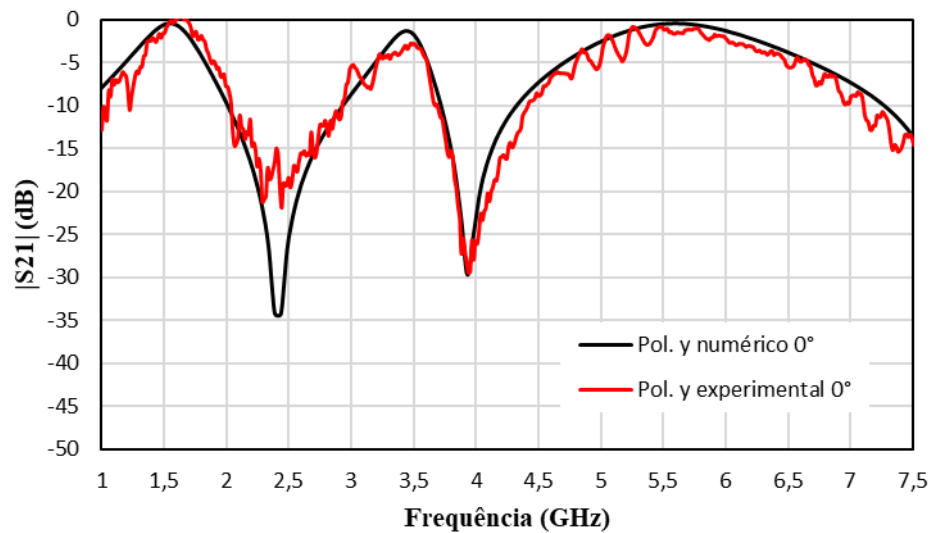
Figura 44 – FSS02 fabricada



Fonte: Autor

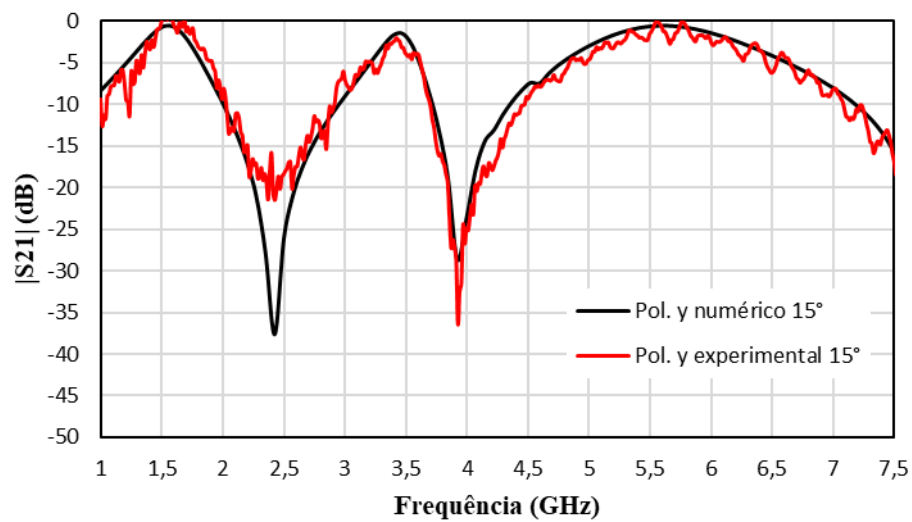
Nas Figuras 45 – 48 são apresentados, para a FSS01, as respostas em frequência $|S_{21}|$ (dB) \times Freq.(GHz), para a polarização y, ângulos de incidência 0° , 15° , 30° e 45° , observando-se que, à medida que o ângulo de incidência varia, verifica-se que ocorre uma pequena variação de frequência de ressonância. As frequências de ressonância obtidas experimentalmente e numericamente, são apresentadas na Tabela 7, observando-se uma boa concordância com uma diferença máxima de 1,90%.

Figura 45 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS01, polarização y ($\theta = 0^\circ$)



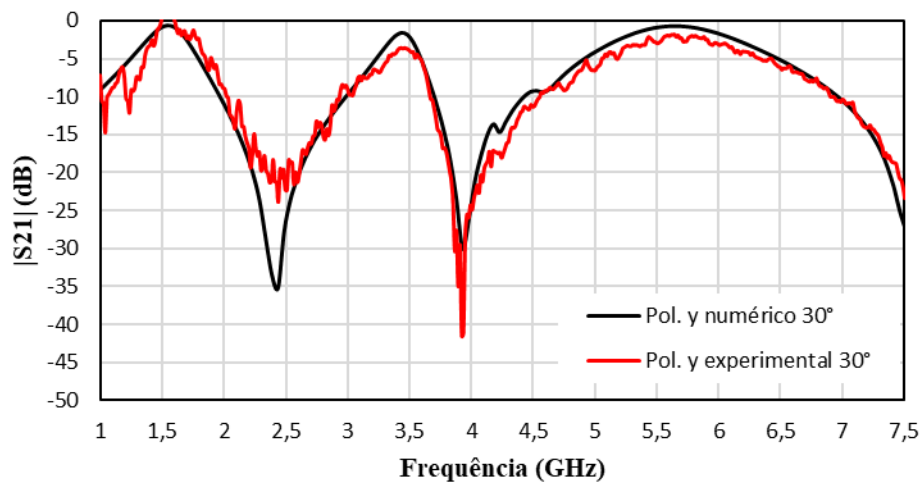
Fonte: Autor

Figura 46 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 15^\circ$)



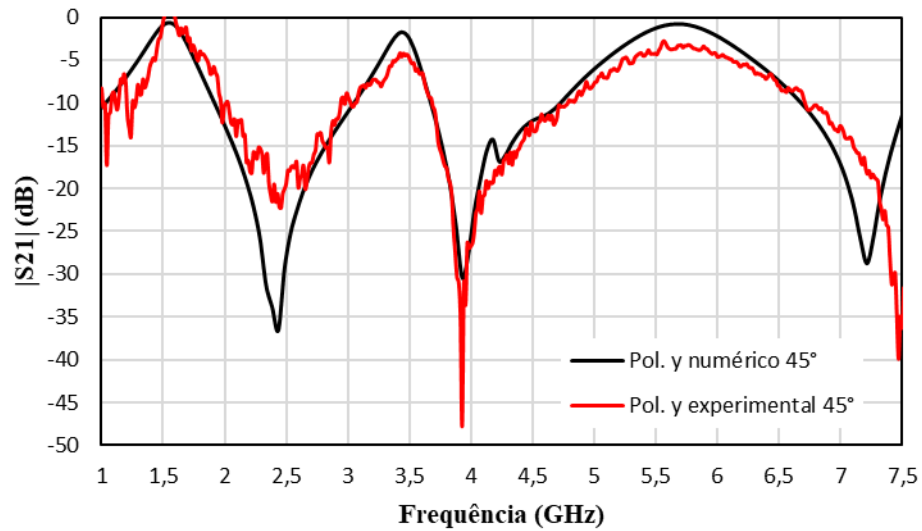
Fonte: Autor

Figura 47 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 30^\circ$)



Fonte: Autor

Figura 48 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS01, polarização y ($\theta = 45^\circ$)



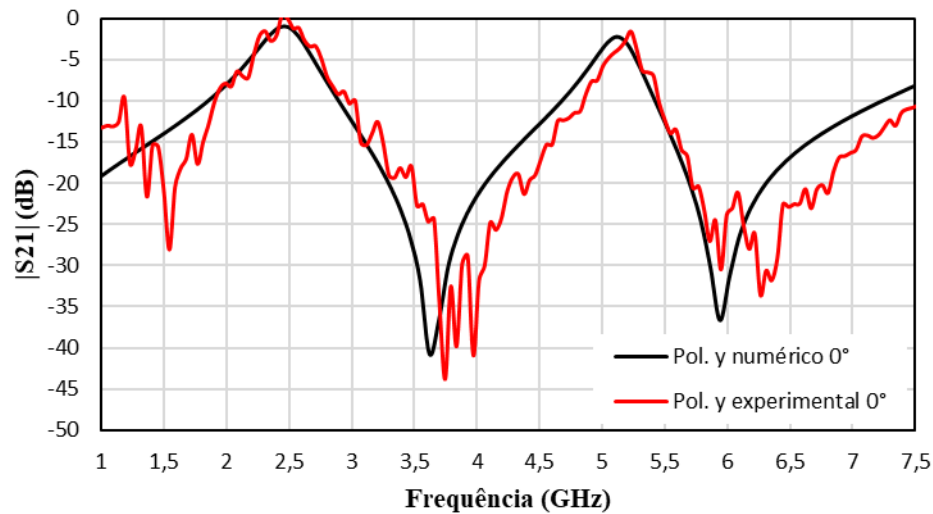
Fonte: Autor

Tabela 7 – Comparação dos resultados experimentais com numéricos, FSS01, polarização y

	Ângulo de incidência	Experimental (GHz)	Numérico (GHz)	Diferença (%)
Freq. de ressonância 1	0°	1,61	1,58	1,90
Freq. de ressonância 2	0°	3,49	3,48	0,29
Freq. de ressonância 1	15°	1,60	1,58	1,26
Freq. de ressonância 2	15°	3,45	3,44	0,29
Freq. de ressonância 1	30°	1,61	1,58	1,90
Freq. de ressonância 2	30°	3,48	3,48	0,00
Freq. de ressonância 1	45°	1,61	1,62	0,62
Freq. de ressonância 2	45°	3,49	3,48	0,29

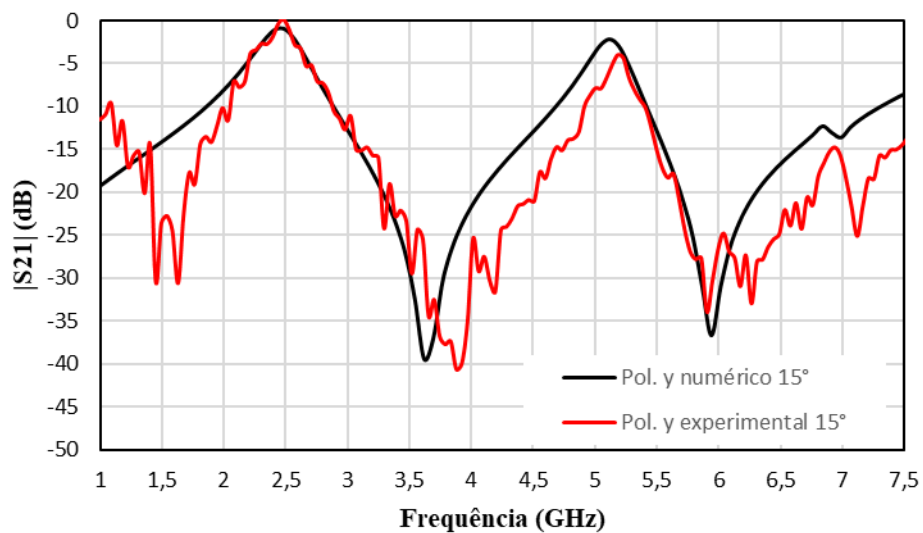
De maneira análoga, nas Figuras 49 – 52 são apresentas, para a FSS02, as respostas em frequência $|S_{21}|$ (dB) \times Freq.(GHz), para a polarização y, ângulos de incidência 0° , 15° , 30° e 45° , observando-se que, à medida que o ângulo de incidência varia, verifica-se que ocorre uma pequena variação de frequência de ressonância. As frequências de ressonâncias obtidas experimentalmente e numericamente, são apresentadas na Tabela 8, observando-se uma boa concordância com uma diferença máxima de 3,69%.

Figura 49 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS02, polarização y ($\theta = 0^\circ$)



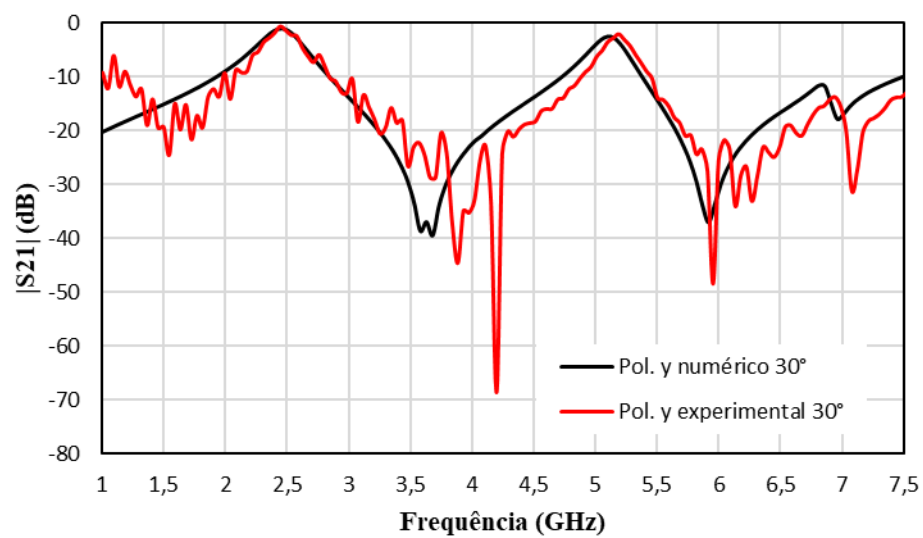
Fonte: Autor

Figura 50 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 15^\circ$)



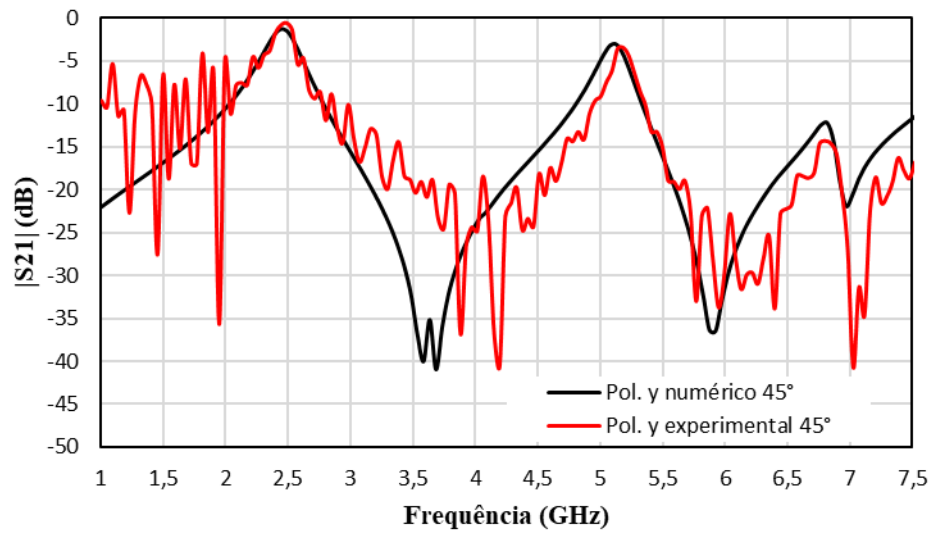
Fonte: Autor

Figura 51 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 30^\circ$)



Fonte: Autor

Figura 52 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, FSS02, polarização y ($\theta = 45^\circ$)



Fonte: Autor

Tabela 8 – Comparação dos resultados experimentais com numéricos, FSS02, polarização y

	Ângulo de incidência	Experimental (GHz)	Numérico (GHz)	Diferença (%)
Freq. de ressonância 1	0°	2,49	2,47	0,81
Freq. de ressonância 2	0°	5,23	5,12	2,15
Freq. de ressonância 1	15°	2,53	2,44	3,69
Freq. de ressonância 2	15°	5,23	5,12	2,15
Freq. de ressonância 1	30°	2,49	2,48	0,40
Freq. de ressonância 2	30°	5,23	5,12	2,15
Freq. de ressonância 1	45°	2,53	2,47	2,43
Freq. de ressonância 2	45°	5,19	5,15	0,77

De maneira geral, verificou-se que as frequências ressonantes medidas têm uma boa concordância quando comparadas às numéricas, mesmo considerando diferentes ângulos de incidência, confirmando que a FSS é angularmente estável. No início da faixa de frequência de medição, observa-se uma maior diferença entre os resultados medidos e numéricos, principalmente para a FSS02. Isso se deve ao maior comprimento de onda que produz efeitos indesejáveis, assim como a obstrução dos absorvedores para ângulos maiores. No entanto, no geral, verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e medidos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, pela primeira vez, foi descrita uma FSS com resposta em frequência passa-faixa, baseada na geometria matrioska. Foram caracterizadas duas FSS variando suas dimensões e fazendo a análise e comparação entre os resultados experimentais, os valores numéricos e os calculados pelas equações propostas.

O objetivo da análise numérica das FSS foi verificar a independência da polarização e a estabilidade angular, mantendo a redução da frequência de ressonância, característica da geometria matrioska.

Foram descritos os procedimentos de projeto da geometria matrioska com resposta passa-faixa e suas principais características, destacando-se a independência da polarização e a estabilidade do ângulo de incidência.

As equações iniciais do projeto deram bons resultados, facilitando o projeto da FSS para outras frequências ressonantes e aplicações específicas. Na caracterização numérica da geometria matrioska foi mantido o tamanho da célula unitária, variando apenas as dimensões das geometrias matrioska, obtendo um deslocamento na frequência de ressonância quando comparado os resultados de uma FSS para a outra. A FSS01 foi numericamente otimizada para apresentar frequências ressonantes em 1,52 GHz e 3,47 GHz, com banda de rejeição em 2,42 GHz. A FSS02 foi otimizada para ter frequências ressonantes em 2,42 GHz e 5,11 GHz, com banda de rejeição em 3,61 GHz.

Duas FSS foram fabricadas e caracterizadas, observando-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Para os diferentes ângulos de incidência, de 0° a 45°, as frequências ressonantes medidas permaneceram praticamente constantes, confirmando a estabilidade angular.

As características observadas tornam a FSS potencialmente interessante para diversas aplicações nos sistemas de telecomunicações.

• **TRABALHOS FUTUROS**

Para continuidade desta dissertação trabalho propõe-se o desenvolvimento de novas pesquisas, como, por exemplo:

- Investigar novas geometrias independentes de polarização e angularmente estáveis.
- Aplicar as geometrias desenvolvidas na otimização de antenas;
- Aplicar as FSS desenvolvidas em FSS em cascata;
- Avaliar o efeito da largura da fita e do espaçamento entre os anéis na resposta em frequência das FSS desenvolvidas.

TRABALHOS PUBLICADOS

G. Neto, J. C. e Silva, A. G. Barboza, D. F. Mamedes, I. B. G. Coutinho and M. de Oliveira Alencar, "Varactor-Tunable Four Arms Star Bandstop FSS With a Very Simple Bias Circuit," *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 2019

A. G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, M. de Oliveira Alencar, I. de França Albuquerque, B. L. G. dos Santos, "Polarization Independent Triple-Band Frequency Selective Surface Based on Matryoshka Geometry", *2019 18th edition of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, 2019

A. G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, M. de Oliveira Alencar, D. M. de Andrade, "Superfície Seletiva em Frequência com Três Bandas de Rejeição com Aplicação à Faixa de 2,4 GHz" *2019 37º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Petrópolis, Rio de Janeiro, 2019

Alfredo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Alexandre Jean René Serres, Marina de Oliveira Alencar, Ianes Barbosa Grécia Coutinho, Thamyris da Silva Evangelista, "Dual-Band Band-Pass Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry with Angular Stability and Polarization Independence," *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, 2020

Alcantara Neto, Miercio; Renato Oeiras Ferreira, Helio ; Araújo, Jasmine ; José Brito Barros, Fabricio ; Gomes Neto, Alfredo ; Oliveira Alencar, Marina ; Cavalcante, Gervasio. A new compact, broadband, and dual-band FSS for satellites applications, optimized through hybrid bioinspired multiobjective technique. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, v. 1, p. 1, 2020

Gomes Neto, Alfredo; Costa e Silva, Jefferson ; Coutinho, Ianes ; Alencar, Marina ; Andrade, Diego . Triple Band Reject Frequency Selective Surface with Application to 2.4 GHz Band. *Journal of Communication and Information Systems (JCIS)*, v. 35, p. 77-85, 2020

Alcantara Neto, Miercio ; Renato Oeiras Ferreira, Helio ; Araújo, Jasmine ; José Brito Barros, Fabricio ; Gomes Neto, Alfredo ; Oliveira Alencar, Marina ; Cavalcante, Gervasio. A new

compact, broadband, and dual-band FSS for satellites applications, optimized through hybrid bioinspired multiobjective technique. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, v. 1, p. 1, 2020.

Segundo, F. C. G. S.; Campos, A. L. P. S. ; Gomes Neto, A. ; Alencar, M. O. . Double Layer Frequency Selective Surface for Ultra Wide Band Applications with Angular Stability and Polarization Independence. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 18, p. 328, 2019.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Clegg e A. Weisshaar Eason, "Future radio spectrum access," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, pp. 239–241, March 2014.
- [2] ITU, "Competition and regulation in a converged broadband world," 2013. Disponível em www.itu.int/ITU-D/treg/publications. Acesso em 02 de Janeiro de 2019.
- [3] M. K. Afzal, Y. B. Zikria, S. Mumtaz, A. Rayes, A. Al-Dulaimi and M. Guizani, "Unlocking 5G Spectrum Potential for Intelligent IoT: Opportunities, Challenges, and Solutions," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, pp. 92-93, Oct. 2018.
- [4] C. Mooney, M. Hari, A. Arden, M. Habib, J. Park, L. Manuel Martinez, "Industry Top Trends 2019: Telecommunications," in S&P Global Ratings, November 15, 2018.
- [5] A. Gomes Neto, A. G. D'Assunção Junior, J. C. Silva, I. S. S. Lima, L. C. M. d. Moura, R. G. G. d. Carvalho, "Ajuste da resposta em frequência de FSS com geometria estrela de quatro braços", *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – MOMAG2014*, Curitiba, 2014.
- [6] <https://pixabay.com/pt/photos/telecomunica%C3%A7%C3%B5es-antenas-818114/>
- [7] S. Habib, G. I. Kiani and M. F. U. Butt, "Interference mitigation and WLAN efficiency in modern buildings using energy saving techniques and FSS," *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Fajardo, 2016, pp. 965-966.
- [8] Q. Zeng, J. Li and T. Denidni, "Solution for overcoming interference - radiation pattern reconfigurable antennas," *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Cartagena des Indias, 2018, pp. 961-965.
- [9] Jiayin Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**, PhD Thesis, The University of Sheffield, Sheffield, Uk. June, 2014.
- [10] Hashemi, S., & Abdolali, A. (2017). "Room shielding with frequency-selective surfaces for electromagnetic health application,". *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(2), 291-298.
- [11] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces - Analysis and Design**, England: Research Studies Press, 1997.
- [12] A. Edalati and T. A. Denidni, "Frequency selective surfaces for beam- switching applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 1, pp. 195-200, Jan. 2013.
- [13] Panwar R., Lee J. R., "Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review,". *Aerospace Science and Technology*, vol. 66, pp. 216-234, Jul. 2017.

- [14] Anwar, Rana S.; Mao, Lingfeng; Ning, Huansheng. 2018. "Frequency Selective Surfaces: A Review," *Appl. Sci.* 8, no. 9: 1689.
- [15] I. S. S. Lima, "**Caracterização de FSS com Geometria em Forma de Estrela de Quatro Braços**", João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [16] H. P. A. Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [17] J. N. Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [18] A. G. Neto, J. C. e Silva, J. N. de Carvalho, J. d. N. Cruz and H. d. P. A. Ferreira, "Analysis of the resonant behavior of FSS using matryoshka geometry," *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-5.
- [19] A. G. Neto, T. R. de Sousa, J. C. E. Silva and D. F. Mamedes, "A Polarization Independent Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry," *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA, 2018, pp. 999-1002.
- [20] T. R. Sousa, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequências Baseadas na Geometria Matrioska Independente da Polarização**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2019.
- [21] A. G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, M. de Oliveira Alencar, I. de França Albuquerque, B. L. G. dos Santos, "Polarization Independent Triple-Band Frequency Selective Surface Based on Matryoshka Geometry", *2019 18th edition of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, 2019.
- [22] A. G. Neto, J. C e Silva, A. J. R. Serres, M. O. Alencar, I. B. G. Coutinho, T. S. Evangelista, "Dual-Band Band-Pass Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry with Angular Stability and Polarization Independence," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, March 2020.
- [23] I. B. G. Coutinho, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência Associados as Geometrias Dipolos Cruzados e Matrioska**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2019.
- [24] M. Hurber, "Boneca Matrioska," Disponível em: <http://mauriciohuber.blogspot.com.br/2011/08/Matrioska.html>, consultado em 03/01/2019.
- [25] L. Bo, X. Huang, Z. Lei, Z. Yixiong, T. Yiming, L. Wen-Jun, B. Yaming, "Bandpass frequency selective structure with improved out-of-band rejection using stacked single-layer slotlines", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, n. 11, Novembro 2018.

- [26] Tian-Wu Li, Da Li, Er-Ping Li, “A novel FSS Structure with high selectivity and excellent angular stability for 5G communication radome”, *2017 10th Global Symposium on Millimeter-Waves*, Hong Kong, 2017, pp. 50-52.
- [27] Y. Mingbao, W. Jiafu, M. Hua, F. Mingde, P. Yongpiang, Q. Shaobo, Z. Jieqiu, Z. Lin “A tri-band, highly selective, bandpass FSS using cascaded multilayer loop arrays”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, n. 5, May, 2016.
- [28] A. Aliya Dewani, G. Stheven O’Keefe, V. David Thiel e A. Galehdar, “Window RF shielding film using printed FSS,” *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 66, n. 2, pp.790–796, Feb. 2018.
- [29] L. Subrt, P. Pechac, A. Vallecchi, L. Ford, R. Langley, J. Rigelsford, “Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments,”, *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Hague, Netherlands, April 6–11,2014, pp. 620–622.
- [30] A. A. Dewani, S. G. O’Keefe, D. V. Thiel and A. Galehdar, "Window RF shielding film using printed FSS," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 790-796, Feb. 2018.
- [31] M. Raptopoulos and S. Stavrou, “Frequency selective buildings through frequency selective surfaces,”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998– 3005, Aug. 2011.
- [32] C. P. da Costa., **Análise e Projeto de Estruturas Seletivas de Frequência Tridimensionais**, Natal, RN, UFRN, Tese de Doutorado, 2015.
- [33] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha, T. R. Fernandes, “3-D Mechanically tunable square slot FSS”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, n. 1, Jan. 2017.
- [34] R. Mittra, C. H. Chan e T. Cwik, “Techniques for analyzing frequency selective surfaces - a review”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, n. 12, pp. 1593 – 1615, Dec. 1988.
- [35] T. K. Wu, **Frequency-Selective Surface and Grid Array**, Wiley, New York, 1995.
- [36] B. A. Munk, “**Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**”, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [37] K. Delihacioglu, S. Uckun, T. Ege, “L-Shaped frequency selective surfaces as conducting elements on chiral slab”, in *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 8, n. 4, pp. 1398 – 1401, Aug. 2006.
- [38] R. M. S. Cruz, “**Análise e Otimização de Superfícies Seletivas de Frequência Utilizando Redes Neurais Artificiais e Algoritmos de Otimização Natural**”. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

- [39] R. H. C. Maniçoba, A. G. D’Assunção, A. L. P. S. Campos, “Improving stop-band properties of frequency selective surface with koch fractal elements”, in *IEEE 2010 International Workshop on Antenna Technology*, Lisboa, Portugal, Mar. 1 – 3, 2010.
- [40] S. Uçkun, T. Ege, “Three concentric rings as frequency selective surfaces on isotropic chiral slabs”, in *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 8, n. 1, pp. 345 – 349, Feb. 2006.
- [41] D. Singh, A. Kumar, S. Meena, V. Agarwala, “Analysis of frequency selective surfaces for radar absorbing materials”, in *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 38, pp. 297 – 314, 2012.
- [42] A. L. P. de S. Campos, “**Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**”. Editora do IFRN, Natal (2009).
- [43] A. N. da Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [44] P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos e E. E. C. Oliveira, “Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski Island fractal,” in *Journal of Microwaves, Opt. Electromagnetic Applications*, vol. 9, n. 1, pp. 43–49, Jun. 2010.
- [45] D. B. Webb, E. Michielssen and R. Mittra, “Thick frequency selective surfaces,” *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, Chicago, IL, USA, 1992, pp. 1795-1798 vol.4.
- [46] P. Harms, R. Mittra and Wai Ko, “Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 9, pp. 1317-1324, Set. 1994.
- [47] W. Tang, J. Zhu, C. Wang, J. Ge, Z. Yu and W. Zhuang, "Waveguide 3-D FSSs by 3-D printing technique," *2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Cairns, QLD, 2016, pp. 675-678.
- [48] Y. Shang, X. Lei, C. Liao and J. Chen, "Frequency-Selective Structures With Suppressed Reflection Through Passive Phase Cancellation," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 2, pp. 1192-1197, Feb. 2020.
- [49] G. I. Kiani, **Passive, Active e Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications**, Sidney, Australia: Macquarie University, Tese de Doutorado, 2009.
- [50] Costa, A. P., **Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2016.

- [51] B. Sanz-Izquierdo and E. A. Parker, "Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 2, pp. 764-771, Feb. 2014.
- [52] J. Yuan, S. Liu, X. Kong and H. Yang, "A reconfigurable frequency selective surface for tuning multi-band frequency response separately," *2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, Nanjing, 2013, pp. 1288-1290.
- [53] H. Zahra, S. Rafique, M. F. Shafique and K. P. Esselle, "A switchable frequency selective surface based on a modified Jerusalem-cross unit cell," *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, 2015, pp. 1-2.
- [54] M. Safari, C. Shafai and L. Safai, "Frequency selective surface implemented using MEM-switched ground plane slots," *2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS)*, Maui, HI, 2012, pp. 1-4.
- [55] X. Liang, L. Li, J. A. Bossard and D. H. Werner, "Reconfigurable frequency selective surfaces with silicon switches," *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, NM, 2006, pp. 189-192.
- [56] S. Kitagawa, R. Suga, K. Araki and O. Hashimoto, "Active absorption/transmission FSS using diodes," *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, 2015, pp. 1538-1541.
- [57] Evangelista T. S., **Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços para Aplicação em 2,4 GHz**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2018.
- [58] F. C. G. da Silva Segundo, **Análise e Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência Multibanda e/ou Banda Larga**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2014.
- [59] T. K. Chang, R. J. Langley, and E. A. Parker, "Frequency selective surfaces on based ferrite substrates," *IEEE Electronic Letters*, vol. 30, n. 15, pp. 1193- 1194, 1994.
- [60] K. ElMahgoub, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "Design of novel reconfigurable frequency selective surfaces with two control techniques," *Progress In Electromagnetics Research*, vol.35, pp. 135-145, 2013.
- [61] S. N. Azemi, K. Ghorbani and W. S. T. Rowe, "A reconfigurable FSS using a spring resonator element," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 781-784, 2013.
- [62] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha and T. R. Fernandes, "3-D Mechanically Tunable Square Slot FSS," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 1, pp. 242-250, Jan. 2017.
- [63] T. K. Chang, R. J. Langley e E. A. Parker, "Active Selective Surfaces", *IEEE Proceedings on Antennas and Propagation*, vol. 143, pp. 62-66, 1996.

- [64] Brandx00E3o, T. H. et al. "FSS-based dual-band cassegrain parabolic antenna for RadarCom applications." 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) (2017).
- [65] Duan, Zhonghang & Abomakhleb, Gheit & Lu, Guizhen. (2019). Perforated Medium Applied in Frequency Selective Surfaces and Curved Antenna Radome. *Applied Sciences*. 9. 1081. 10.3390/app9061081.
- [66] J. B. O. Silva, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência com Banda Dupla de Operação Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços Associada a Anéis Trapezoidais**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [67] P. C. Kim, D. G. Lee, I. S. Seo, G. H. Kim, "Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surface," *Compos Sci Technol*, vol. 68, no. 9, pp. 2163-2170, 2008.
- [68] R. C. McPhedran, D. Maystre, "On the theory and solar application of inductive grids", *Appl. Phys* 14, 1-20, 1977.
- [69] M. Gustafsson, A. Karlson, A. P. P. Rebelo, B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, pp. 1897 – 1900, 2006.
- [70] S. Preradovic, N. Karmakar, *Multiresonator-Based Chipless RFID*. Philadelphia: LLC, 2012. Referências 88
- [71] A. Vena, E. Perret e S. Tedjini, "Novel compact RFID chipless tag," *PIERS Proceedings*, pp. 1062-1066, Março 2011.
- [72] A. Lazaro, A. Ramos, D. Girbau, R. Villarino, "A novel UWB RFID tag using active frequency selective surface." *IEEE Trans. And Propag.* Vol.61, no.3, 2013.
- [73] S. Tedjini, "Hold the chips," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 14, no.5, pp. 56-65, 2013.
- [74] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 5, pp. 904 – 909 (1982).
- [75] G. Zarrillo and K. Aguiar, "Closed-Form low frequency solutions for electromagnetic waves through a frequency selective surface", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 35, no. 12, pp. 1406 – 1417 (1987).
- [76] L. E. Vaz, **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- [77] R. F. Harrington, "The method of moments-a personal review," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next*

Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting C, Salt Lake City, UT, USA, 2000, pp. 1639-1640 vol.3.

[78] Henri Baudrand, Mohammed Titaouine, Nathalie Raveu, **The Wave Concept in Electromagnetism and Circuits: Theory and Applications**, John Wiley & Sons, USA, 2016.

[79] A. C. de C. Lima, **Fundamentos de Telecomunicações: Teoria eletromagnética e aplicações**, notas de aula. Universidade Federal da Bahia - UFBA, 2002.

[80] E. F. Harris, "An experimental investigation of the corner-reflector antenna," *Proceedings of the IRE*, vol. 41, no. 5, pp. 645-651, May 1953.

[81] N. J. P. L. Ramos, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência**, João Pessoa, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, 2016.

[82] R. Simons, *Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems*, USA: Wiley, 2001.

[83] AppCAD, disponível em <http://www.hp.woodshot.com/> , acessado em 24/03/2020.

[84] <http://www.ansys.com>, consultado em 15/01/2019.

[85] <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5479EN.pdf?id=862560>

[86] <https://www.ahsystems.com/catalog/SAS-571.php>